ESTADO DEL ARTE Y POTENCIALES RECURSOS CO Y MN EN CHILE

Brian Townley, Alejandro Díaz y Rodrigo Luca

Advanced Mining Technology Center (AMTC)

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

Universidad de Chile

Diciembre 2017

Contenido

1. Introducción 1

1.1 Objetivos 1

1.2. Alcances del presente estudio 2

1.3. Metodología 2

1.4. Antecedentes y reseña histórica 2

1.5. Metalogénesis de Chile y ambientes de potencial por Cobalto y Manganeso 4

1.5.1. Yacimientos históricos de Cobalto como mena principal 4

1.5.2. Yacimientos históricos de Manganeso como mena principal 5

1.5.3. Metalogénesis de Chile y ambientes de potencial por Cobalto y Manganeso 5

2. Tipos de yacimientos en Chile con potencial por Cobalto 10

2.1. Yacimientos de potencial mena primaria por Cobalto 11

2.2. Yacimientos con potencial por Cobalto como subproducto 12

2.3. Relaves con potencial por Cobalto 13

3. Tipos de yacimientos en Chile con potencial por Manganeso 14

3.1. Yacimientos de mena primaria por Manganeso 14

3.2. Otras posibles fuentes de Manganeso 15

3.3. Potencial por manganeso en relaves de la minería Chilena 17

4. Selección y descripción de Distritos de explotación histórica y/o con potencial para explotación de Co y Mn 18

4.1. Distritos por Cobalto 18

4.1.1. Distrito San Juan 18

4.1.2. Distrito Tambillos 21

4.1.3. Otros distritos de interés por Cobalto 24

4.2. Distritos por Manganeso. 28

4.2.1. Distrito Lambert 29

4.2.2. Distrito Arqueros. 30

4.2.3. Distrito Talcuna 33

4.2.4. Distrito Las Cañas 33

4.2.5. Distrito Corral Quemado 34

4.2.6. Distrito minero El Arrayán 37

4.2.7. Distrito minero Fragua 37

4.2.8. Recursos Mineros por Manganeso 38
5. Metalurgia extractiva y recuperación de Cobalto y Manganeso 40
5.1. Mineralogía del Cobalto y metalurgia extractiva 40
5.1.1. Procesamiento de minerales – metalurgia extractiva 41
5.1.2. Extracción y refinado 41
5.2. Mineralogía del cobalto y metalurgia extractiva en Chile 42
5.2.1. Procesos de Concentración de Cobalto 43
5.2.2. Procesos de obtención de Cobalto 44
5.3. Mineralogía del Manganeso y metalurgia extractiva 45
5.3.1. Mineralogía 45
5.3.2. Minería y concentración 46
5.3.3. Extracción y refinado 48
5.4. Mineralogía del manganeso y metalurgia extractiva en Chile 49
Referencias 50

1. Introducción

En el presente informe se describen e integran los resultados de un estudio del estado del arte acerca de los potenciales recursos minerales existentes en Chile por los elementos cobalto y manganeso, con un énfasis en las regiones de Atacama, Coquimbo y Metropolitana. Este estudio se ha realizado por petición expresa de la Vicepresidencia de CORFO, desarrollado a través de la Comisión de Minería No Metálica (CMNM) de la misma institución. El presente estudio, propuesta original generada por SERNAGEOMIN para CORFO, es ejecutado por el Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Universidad de Chile, los trabajos realizados desde el 1 de septiembre en adelante, por un plazo máximo de cuatro meses. En este informe se entregan los resultados de la primera etapa de estudio, enfocados en la búsqueda de información nacional en internacional acerca de la minería y recursos del cobalto y manganeso, recursos y explotación histórica en Chile, y evaluación del potencial presente por recursos minerales para una eventual producción nacional.

La motivación para la realización de los estudios solicitados por CORFO se centra en las necesidades estratégicas por recursos naturales para una producción y oferta nacional de los metales cobalto y manganeso. Esta necesidad nace a partir de una pronta producción y disponibilidad interna que existirá por litio, esto producto de licitaciones internacionales generadas por CORFO, que aseguran una oferta nacional de este producto. El uso principal de litio al presente lo constituyen baterías del tipo Li-Co-Mn, lo que motiva potenciales intereses por parte de consorcios internacionales a considerar la instalación de fábricas de baterías en Chile. Este escenario hace necesario, en el caso ideal, contar con una oferta nacional de Co y Mn, de tal forma de suplir de forma interna todos los insumos necesarios para la elaboración de cátodos de litio.

1.1 Objetivos

El objetivo general de este informe es proveer una visión global de los potenciales recursos existentes en Chile, en particular enfocado en las regiones de Atacama, Coquimbo y Metropolitana, por cobalto y manganeso. Esta revisión se basa exclusivamente en una búsqueda de información bibliográfica nacional e internacional, tanto de informes públicos como privados o confidenciales a los cuales se ha logrado acceso (autorizados por gestión de CORFO), de tal forma de elaborar un estado del arte al respecto de los conocimientos que existen acerca de los recursos potenciales existentes por estos metales.

Los objetivos específicos de este informe son:

- Presentar los antecedentes históricos al respecto de la explotación pasada de cobalto y manganeso en Chile.

- Describir las características minerales de ocurrencia de estos metales, los ambientes geológicos en los cuales ocurren, y la factibilidad minera y metalúrgica de recuperación según tipo de ocurrencia.

- Describir los ambientes tectónicos, magmáticos y metalogénicos en los cuales existe mayor potencialidad de ocurrencia de estos metales, ya sea como yacimientos de mena primaria, o yacimientos en los cuales estos metales pudieran representar un subproducto relevante. En base a esto y a información existente, evaluar también los posibles recursos que pudieran existir y ser recuperados en forma económica en depósitos de relaves.

- Describir y evaluar algunos de los distritos mineros históricos más relevantes de explotación de estos metales en Chile, revisión de datos de recurso y producción pasada y estimación de los potenciales recursos geológicos remanentes.

- En base a la ocurrencia mineral preponderante en yacimientos antiguos conocidos, evaluación de los procesos de tratamiento y recuperación metalúrgica de estos metales y análisis de factibilidad técnico – económica de recuperación respecto de otros productores internacionales.

1.2. Alcances del presente estudio

Para el desarrollo de este estudio de estado del arte, si bien este inicio el 1 de septiembre de 2017, la compilación de información fue rápida solamente para aquella información pública, existiendo material que no fue posible conseguir hasta ya avanzado en los estudios. El tiempo disponible para este levantamiento y revisión de información por otra parte es limitado, existiendo información tardía que para este informe no ha sido factible revisar en profundidad.

Otro aspecto relevante es que el enfoque del presente estudio se ha orientado netamente a las regiones de interés, Atacama, Coquimbo, y en menor medida, Metropolitana. No obstante lo anterior, en la revisión se ha incluido otros potenciales ambientes geológicos en los cuales pudiera existir ocurrencia de Co y Mn, pero esto último solamente basado en bibliografía.

1.3. Metodología

Para el desarrollo del presente estudio se han empleado una diversidad de buscadores de información, incluyendo buscadores de publicaciones internacionales (ej. ISI Web o Knowledge, SCOPUS) y búsquedas nacionales en las bibliotecas de Universidades Chilenas, en la biblioteca y bases de datos de SERNAGEOMIN, en la biblioteca de CORFO, y en las bases de datos públicas de ENAMI. En el anexo 1 se presenta un listado de todas las publicaciones e informes encontrados, aquellos que son digitales y de los cuales se tiene copia, integrados en una base datos digital adjunta al presente informe. Adicional a estas búsquedas digitales, también se revisaron y accedieron informes y bases de datos regionales, tanto de SERNAGEOMIN como otros servicios públicos, tanto en la región de Atacama como Coquimbo.

1.4. Antecedentes y reseña histórica

Si bien Chile se ha caracterizado históricamente por ser un país minero, antiguamente un productor mundial de nitratos (salitre) y al presente un productor mundial y poseedor de los principales recursos cupríferos del mundo, el enfoque mono productor de la industria minera hace

que Chile sea un país económicamente vulnerable y dependiente en el presente de su recurso mineral principal, cobre. Esta dependencia se relaciona intrínsecamente con las características geológicas del margen Andino Chileno, ambiente de subducción del tipo arco continental, en el cual han ocurrido aquellos procesos geológicos conducentes a la formación de yacimientos gigantes a monstruosos de cobre, los más relevantes, yacimientos del tipo pórfido cuprífero, con menor ocurrencia de otros tipos de yacimientos de cobre (skarns, estratoligados, óxidos de hierro-cobre-oro [IOCG], vetas), de metales base (skarn, vetas), de metales preciosos (vetas y brechas) y de hierro (hierro-apatito [IOA] e IOCG).

El sitial de principal productor de cobre mundial no implica que en Chile no existan otros recursos minerales metálicos; Chile ha ocupado lugares relevantes en la producción de oro, plata, y es en el presente un importante productor de hierro. Cabe destacar que la gran minería del cobre Chilena tiene también una relevante producción de subproductos, entre estos oro, plata, molibdeno, que si bien es un aspecto positivo para la minería en Chile, es también un aspecto que opaca y resta oportunidades a la exploración y explotación de otros productos minerales metálicos, ya se traten de yacimientos con menas principales de metales distintos a cobre u oro, o a la recuperación de subproductos distintos a oro, plata, molibdeno desde los mismos yacimientos de cobre. Estos aspectos negativos de la minería Chilena son conocidos desde larga data, detectados como vulnerabilidad desde ya en la década de los 60’ en el siglo pasado (D’Aubarede, 1969), existiendo esfuerzos históricos del estado por levantar interés e inversión en la explotación de otros recursos minerales, pero sin desarrollos relevantes respecto de la minería del cobre.

En tiempos actuales, los avances tecnológicos en el desarrollo de vehículos eléctricos, ha impulsado usos de una diversidad de productos minerales que en el pasado han observado menor demanda de mercado. La masificación de tecnologías de baterías de litio-níquel, litio-cobalto y litio-cobalto-manganeso imprimen una demanda en aumento creciente por estos metales, aspecto que abre una ventana de oportunidad real para una diversificación de la producción minera Chilena. En una perspectiva de recursos minerales, Chile, adicional al cobre, es poseedor de enormes recursos de litio, potencialmente un fuerte competidor mundial respecto de otros productores como Bolivia, Argentina y Australia. Por otra parte, una producción interna de litio pudiera ser aprovechada para efectos de la generación y fabricación de productos de valor agregado, entre estas, baterías de ión litio. Estrategias de valor agregado de este tipo requieren la búsqueda, evaluación y explotación de otros recursos metálicos, de los mencionados para baterías, existentes en Chile, cobalto y manganeso.

En Chile fueron explotados en el pasado tanto yacimientos de cobalto como de manganeso, el cobalto en el siglo pasado, hasta 1944, y el manganeso hasta épocas más recientes, 2009. Los yacimientos de cobalto explotados se ubican en las regiones de Atacama, Coquimbo y Metropolitana. La explotación documentada de cobalto en Chile se inició el año 1844, a mitad del siglo XIX, en el distrito Tambillos, región de Coquimbo, y en la región Metropolitana, sectores del El Volcán y Río Maipo. En 1865 y 1875 se explotaron yacimientos en el distrito San Juan, sectores de Huasco, y también en las cercanías de Copiapó. La producción de cobalto se mantuvo desde aquellos tiempos, con varias interrupciones, hasta el año 1944. La explotación de cobalto se realizó principalmente para exportación, primordialmente para su uso en aleaciones de acero, la mayor demanda por este metal ocurrida durante la II Guerra Mundial. El fin de la guerra marcó

también la paralización de las faenas de explotación y producción. Los distritos de mayor producción en el mencionado periodo de explotación fueron los distritos de San Juan, región de Atacama, y Tambillos, región de Coquimbo.

Los yacimientos de manganeso explotados históricamente se ubican en las regiones de Atacama y Coquimbo, la explotación mayoritariamente para uso en demanda nacional. La explotación documentada de manganeso comenzó a principios del siglo XX desde el distrito de Corral Quemado, región de Coquimbo, seguido de otros distritos cercanos, Lambert, El Romero, La Liga, Arrayán y Fragua, en la misma región, y algunos yacimientos menores en la región de Atacama. La producción de manganeso en Chile ha sido destinada principalmente a su uso en aleaciones de acero, producción que se mantuvo por parte de la empresa Manganesos de Atacama S.A. hasta el 2009. Posterior a esta fecha solamente existe producción menor, los principales distritos en el presente en proceso de cierre oficial.

1.5. Metalogénesis de Chile y ambientes de potencial por Cobalto y Manganeso

1.5.1. Yacimientos históricos de Cobalto como mena principal

La síntesis de información a continuación se extrajo de informes de Sernageomin, resumidos en la propuesta preparada por Sernageomin para CORFO. Los yacimientos con mena primaria por cobalto, explotados en Chile y distribuidos en las regiones de Atacama, Coquimbo y Metropolitana, corresponden principalmente a cuerpos de vetas, brechas y en ocasiones en mantos, emplazadas en secuencias de rocas metamórficas, volcánicas, intrusivas y en algunos casos rocas sedimentarias. Respecto de la producción histórica de cobalto solamente en dos distritos se ha explotado en forma relevante cobalto como una mena primaria, estos en el distrito San Juan, región de Atacama, y distrito Tambillos, región de Coquimbo. En el distrito San Juan se presenta mineralización primaria de cobaltita, un sulfo-arseniuro de cobalto, ocurrente en sistemas de vetas, con leyes medias que alcanzan hasta 1,6% Co. En este distrito cabe destacar que la mayor parte de la producción histórica se orientó a la explotación de las menas secundarias (oxidadas), principalmente eritrina, un sulfato-arsenato de cobalto, con cuerpos mineralizados con leyes que alcanzaban leyes de hasta 6,4% Co. En el distrito Tambillo se agrupan yacimientos mantiformes con menas primarias de cobre y cobalto, con cobaltita como mineral primario de cobalto, leyes de explotación en 1942 de 4 a 5% Co, y una ley media reportada en 1968 de 1% Co. En el caso de la región Metropolitana, se reporta históricamente la explotación de yacimientos de vetas en los sectores El Volcán y Río Maipo, yacimientos con una mena primaria de sulfuros, con leyes medias entre 0,5 y 0,7% Co, y leyes máximas entre 2,4 y 2,58% Co. Otro distrito en el cual se ha descrito explotación de cobre y cobalto corresponde Carrizal Alto, región de Atacama, yacimientos en que se presenta una mineralización de cobre y cobalto, con cobaltita como principal mineral. No se cuenta con información de leyes de Co.

1.5.2. Yacimientos históricos de Manganeso como mena principal

La siguiente información se ha extraído de informes de Sernageomin, sintetizados en propuesta elaborado por Sernageomin para Corfo. Las principales minas de manganeso explotados en forma industrial corresponden a mantos, en menor medida vetas, estos ubicados en la región de Coquimbo, y hospedados en dos unidades de roca principales, denominadas Formación Arqueros y Formación Quebrada Marquesa, y en las unidades equivalentes en la región de Atacama. Los yacimientos de mayor envergadura y relevancia se hospedan en rocas de la Formación Quebrada Marquesa, estos de origen mayoritariamente sedimentario marino. El distrito más importante es el de Corral Quemado, tanto por producción como calidad. Le sigue en relevancia los yacimientos Arrayán, Fragua, y en forma decreciente los distritos Las Cañas, Talcuna y Arqueros, todos en la región de Coquimbo. Con menor importancia se menciona también cuerpos mineralizados en el distrito Sierra La Bandera, al norte de Freirina, región de Atacama. Los minerales de mena en estos yacimientos lo constituyen la pirolusita, braunita y psilomelano, en yacimientos que pueden también contener minerales de cobre y plata. Las leyes máximas reportadas oscilan entre 42 y 52% Mn. En las producciones más recientes, antes del cierre, las leyes reportadas a Sernageomin fluctuaban entre 16 y 30% Mn, con explotación por pequeños mineros, lo más relevante producido por Manganesos Atacama S.A. en yacimientos de la región de Coquimbo.

1.5.3. Metalogénesis de Chile y ambientes de potencial por Cobalto y Manganeso

La evolución tectono-magmática del margen Andino Chileno se ha caracterizado desde sus orígenes por una marcada impronta metalogénica por cobre, esto desde los inicios de evolución de los arcos magmáticos más antiguos, en el Paleozoico - Triásico. En dicho periodo de tiempo geológico se desarrollaron diversos yacimientos del tipo pórfido cuprífero, estos distribuidos de norte a sur a lo largo del eje del arco volcánico paleozoico - triásico. Esta franja metalógénica se extiende desde la región de Tarapacá hacia el sur, a lo largo del eje de la cordillera principal de Los Andes, cruzando al lado Argentino al sur de la región de Atacama. Los yacimientos de esta franja (Characolla, El Loa, Lilian, Tornasol, Lila, Río Frío, Alcaparrosa, San Jorge: edades desde 285 a 195 Ma; Fig. 1.1; Maksaev et al., 2007; Maksaev, 2001) no son de relevancia económica, en Chile ninguno de estos en desarrollo, esto dado bajas leyes y pequeños volúmenes.

A partir del Jurásico Superior la evolución del margen Andino Chileno se ha caracterizado por la ocurrencia de yacimientos de cobre, estos de diversos tipos y tamaños. Se describe a continuación, en forma resumida las principales franjas metalogénicas de Chile, desde la más antigua a la más joven.

En la época del Jurásico la impronta principal de mineralización ocurre por cobre en un ambiente del tipo arco volcánico en extensión. Los yacimientos de este periodo son del tipo estrato ligados de cobre, distribuidos a lo largo de la cordillera de la costa de las regiones de Tarapacá a Atacama, desde al norte de la ciudad de Tocopilla, hasta al sur de la ciudad de Chañaral (Fig. 1.1). La mineralización primaria de cobre en estos yacimientos corresponde a calcopirita, bornita y calcosina, con ocurrencias económicas de plata como subproducto en la

recuperación de cobre. Si bien estos yacimientos tienen una impronta marcada por alto hierro, este corresponde principalmente a fases minerales oxidadas, hematita, estos yacimientos presentando escasa pirita. En una perspectiva metalogénica, estos yacimientos no presentan concentraciones relevantes de cobalto o manganeso.

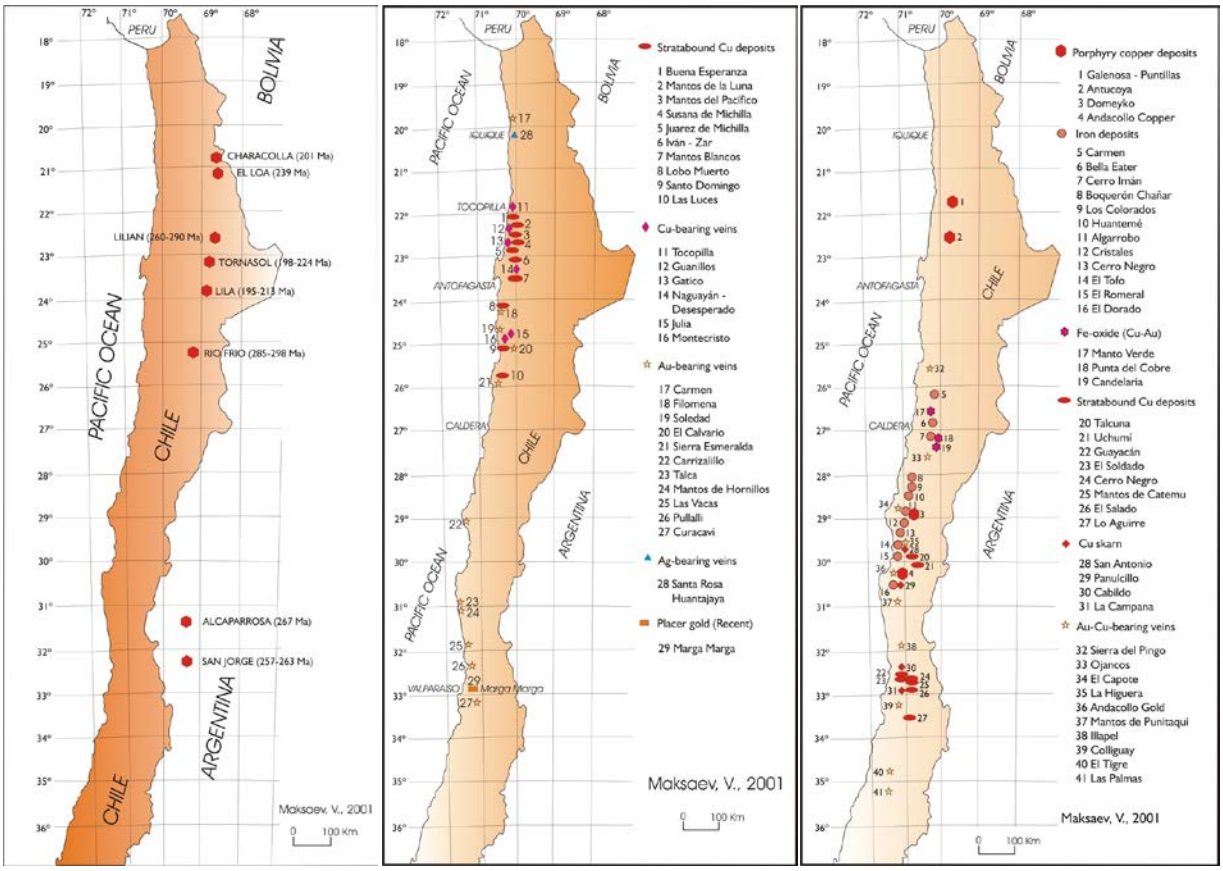


Figura 1.1. Yacimientos del tipo pórfido cuprífero del Paleozoico – Triásico (izquierda); yacimientos del tipo estrato ligados de cobre y vetas de oro y plata del Jurásico (centro); yacimientos del tipo pórfido cuprífero, de hierro apatito (IOA), de óxidos de hierro-cobre oro (IOCG), estrato ligados de cobre, skarn de cobre y vetas de cobre-oro del Cretácico Inferior (Maksaev, 2001).

En la época del Cretácico Inferior se presenta una impronta metalogénica diversa, con el desarrollo de pórfidos cupríferos en la región de Antofagasta y en las regiones de Atacama y Coquimbo. Estos corresponden a yacimientos pequeños comparados a yacimientos del mismo tipo pero de edades más jóvenes (ej. Eoceno – Oligoceno del norte de Chile). En las regiones de Atacama y Coquimbo el arco volcánico de esta edad se extiende desde el norte de Caldera al sur de Coquimbo, caracterizado por yacimientos de óxidos de hierro apatito (IOA) y yacimientos del tipo óxidos de hierro-cobre oro (IOCG), los que se ubican principalmente alojados o relacionados con el Sistema de Fallas de Atacama (SFA). Los yacimientos de hierro del tipo IOA representan la mayor fuente de mena en la minería del hierro nacional. La mena principal de estos yacimientos corresponde a magnetita, con menor proporción de hematita y solamente trazas de fases minerales sulfuradas, pirita, arsenopirita, calcopirita, entre otros. Dada la afinidad entre hierro y cobalto, estos yacimientos pudieran presentar un potencial

por ocurrencia de cobalto como un sub producto residual de la recuperación del hierro, aspecto que se describe más adelante en este estudio. Asociado con esta misma franja de yacimientos de hierro, tanto en el SFA como en el margen este del arco, se presentan yacimientos del tipo IOCG. Estos yacimientos se explotan por su mena de cobre (calcopirita), con oro como subproducto principal. Si bien son yacimientos de alta concentración de hierro, principalmente en forma de magnetita, esta no constituye mena en la producción principal, terminando como un producto residual en los relaves. El reprocesamiento de estos relaves permite a CMP la recuperación del hierro magnético, pero cabe destacar que potencialmente existen otros elementos y minerales de valor en los residuos de estos. Los yacimientos del tipo IOCG en otras partes del mundo y en Chile se caracterizan por una impronta geoquímica de Fe-Cu-Au, junto a elementos del grupo de las tierras raras (REE), cobalto, uranio y torio. En el caso de los IOCG Chilenos (ej. Manto Verde, Candelaria, Distrito Punta del Cobre) si bien la impronta es similar, la ocurrencia mineral y concentraciones de estas no ha sido estudiada en una perspectiva de potencialidad de recuperación metalúrgica. Más al sur en la franja del Cretácico Inferior, desde el sur de Coquimbo a la región de Valparaíso y Metropolitana, la impronta metalogénica cambia a una predominancia de yacimientos del tipo estrato ligados de cobre, el más grande en su tipo el yacimiento El Soldado, en la región de Valparaíso. Estos yacimientos son del mismo tipo que ocurren en el norte, franja Jurásica Superior, teniendo una impronta geoquímica de cobre, con subproducto de plata. En esta misma zona sur de la franja metalogénica se reconoce también la ocurrencia de yacimientos del tipo skarn de cobre, los distritos más relevantes en Chile el de Cabildo, región de Valparaíso, y los de San Antonio y Panulcillo en la región de Coquimbo. Adicional a la mineralización y diversidad de yacimientos asociados con la evolución del arco magmático del Cretácico Inferior, cabe destacar la ocurrencia de yacimientos de vetas de cobre-oro, la mayoría de estos relacionados con el SFA. Finalmente, en relación espacial y probablemente genética con la franja ferrífera de Chile se encuentran yacimientos de vetas y brechas de cobre-cobalto, los distritos más relevantes siendo San Juan, provincia de Huasco, región de Atacama, y Tambillos, en la región de Coquimbo. También asociado con este arco volcánico, en posición de cuencas de intra y tras arco, se presentan yacimientos de manganeso, los más relevantes en la región de Coquimbo, distritos Corral Quemado, Fragua, La Liga, Lambert, entre otros.

En la época Cretácico Superior, asociado con un cambio del régimen tectónico del margen Sudamericano, el que pasa de extensional a compresional, producto de la separación de los continentes Sudamericano del Africano y la expansión del fondo oceánico Atlántico, el desarrollo metalogénico y la impronta de yacimientos minerales se ve fuertemente reducido, solamente con ocurrencia de yacimientos de vetas de cobre-oro, vetas de plata y menor ocurrencia de pórfidos cupríferos (Fig. 1.2), esto últimos siendo pequeños, de bajas leyes y bajo potencial económico. Los yacimientos de plata son los históricamente más relevantes distribuidos entre la región de Antofagasta y Coquimbo, los distritos Caracoles, Chimberos – Tres Puntas, Chañarcillo y Arqueros. Más al sur, desde la región de Coquimbo a la región de O´Higgins ocurren yacimientos de vetas meso a epitermales de oro y metales base, los más relevantes en el distrito Alhue, región de O´Higgins, y el de Bronces de Petorca, región de Valparaíso.

En la época del Paleoceno – Eoceno Inferior ocurre un cambio continuo del ambiente tectónico del margen Sudamericano, en el cual dadas las condiciones de convergencia entre la placa continental y oceánica, evoluciona a un ambiente de tipo transpresivo, esto posterior a la compresión del Cretácico Inferior y el cierre de las cuencas de tras arco del Cretácico Inferior. En este nuevo ambiente tectónico el arco mágmatico de esta época se instala al este del arco Cretácico Superior e Inferior, esto a lo largo del margen Andino del sureste del Perú y del norte de Chile. En este periodo se presenta una impronta metalogénica marcada por cobre y menor plata y oro, con yacimientos del tipo pórfido cobre-molibdeno, yacimientos de vetas de oro y de plata, y ocurrencia de yacimientos de brechas hidrotermales con mineralización de cobre (Fig. 1.2). En esta franja se encuentran distritos de pórfidos de cobre-molibdeno de clase mundial, distribuidos entre las regiones de Tarapacá y Atacama, entre estos, Mocha, Cerro Colorado, Spence, Lomas Bayas, y Relincho. También son relevantes en esta franja los yacimientos de oro y plata, sistemas de vetas epitermales como los presentes en los distritos Faride, San Cristobal, El Peñon y Guanaco, todos en la región de Antofagasta.

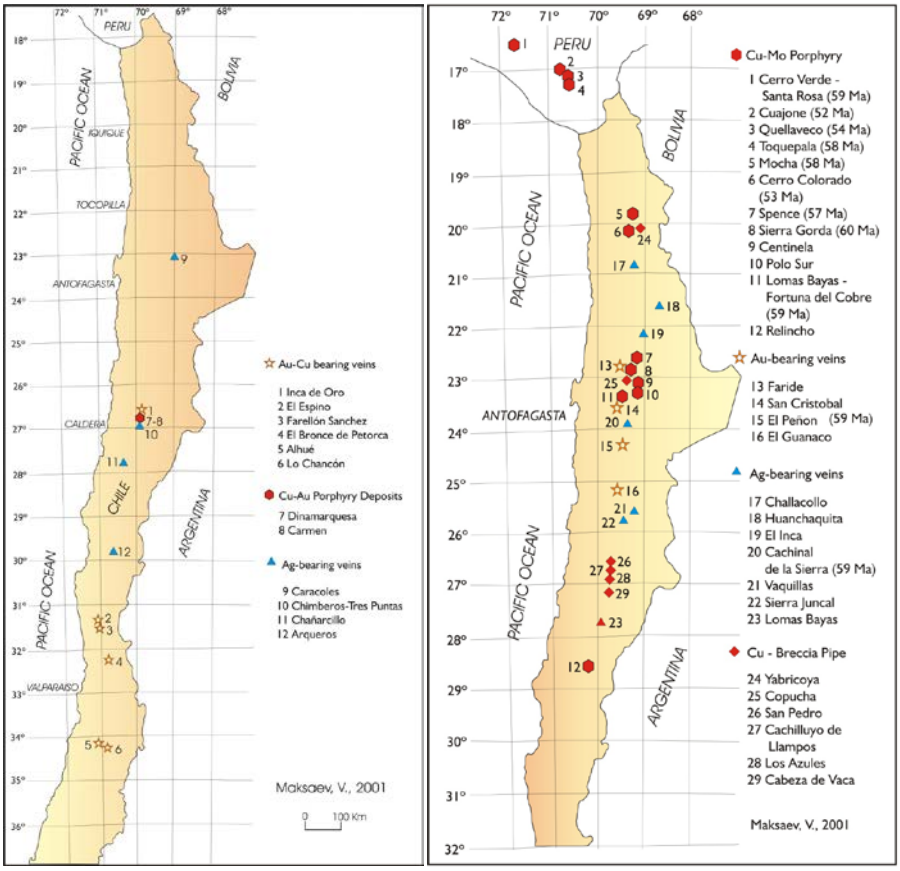


Figura 1.2. Franjas metalogénicas del Cretácico Superior (izquierda) y del Paleoceno – Eoceno Inferior (derecha). Maksaev (2001), Maksaev et al. (2007)

A continuación de la evolución tectónica, magmática y metalogénica del Paleoceno – Eoceno Inferior se instala en el Eoceno Superior – Oligoceno Inferior, al este de la franja previa, lo que es la franja metalogénica más relevante del norte de Chile, la franja de mega yacimientos de pórfido de cobre – molibdeno, franja que se extiende desde la región de Tarapacá hasta la región de Atacama, asociada espacial y genéticamente con el Sistema de Fallas de Domeyko (SFD), zona de deformación que se extiende en dirección NS por más de 1300 Kms. En esta

franja se encuentran los distritos de yacimientos del tipo pórfido cobre – molibdeno más relevantes del país, entre estos, Quebrada Blanca – Collahuasi, Chuquicamata, Escondida, El Salvador, y más al sur, El Morro - La Fortuna (Fig. 1.3). Cabe destacar que en todos estos yacimientos existe una impronta relevante de oro, la concentración promedio en muchos de estos cercano a 0,25 g/t. Esta impronta hace que la recuperación y producción de oro como subproducto de la gran minería del cobre sea la más importante a nivel nacional. Otro subproducto relevante, recuperado con el molibdeno, corresponde a renio. No se conoce o no se ha evaluado otros posibles elementos / minerales de posible interés económico a nivel de subproducto, pero en consideración de los gigantescos volúmenes de rocas explotadas y procesadas, los relaves generados pudieran ser un blanco interesante para la búsqueda y evaluación de oportunidades, no descartable la posible ocurrencia de cobalto y/o manganeso.

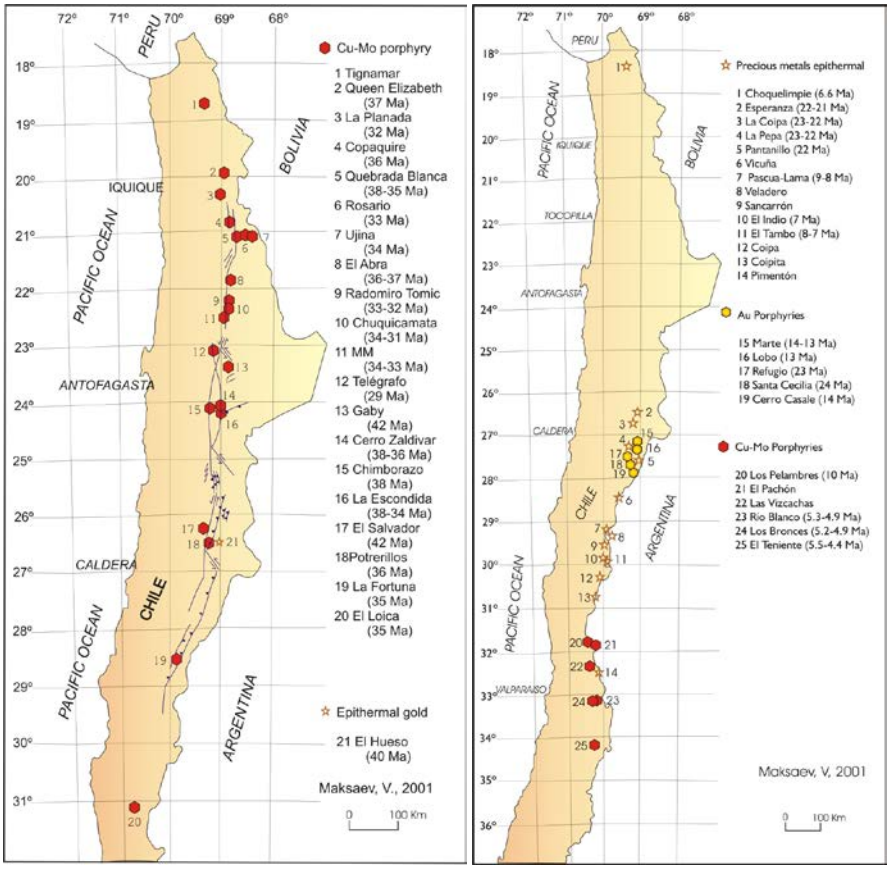


Figura 1.3. Franjas metalogénicas del Eoceno Superior – Oligoceno Inferior del Norte de Chile (izquierda) y del Mioceno de Chile Central (derecha). Maksaev (2001), Maksaev et al. (2007).

Finalmente, desde el Mioceno al Plioceno, la evolución tectónica y magmática del margen Andino se traslada a Chile Central, al este, en la región fronteriza con Argentina (Fig. 1.3). Durante la evolución del arco magmático Mioceno ocurren yacimientos de vetas y brechas epitermales de oro en la franja de Maricunga, región de Atacama, estos junto a yacimientos de pórfido de oro. Más al sur ocurren yacimientos epitermales de oro, entre los yacimientos más relevantes, Pascua – Lama y el distrito El Indio, el primero en la region de Atacama, el segundo, región de Coquimbo. Más al sur, en la alta cordillera, desde Salamanca hasta el Maule, ocurren mega yacimientos del tipo pórfido cobre – molibdeno, Los Pealmbres – Pachón, Río Blanco – Los Bronces, El Teniente, los dos últimos probablemente los depósitos

más grandes del tipo en el mundo. Al sur de El Teniente se reconocen varios prospectos por pórfidos de cobre – molibdeno, el más importante y con mayor potencial, Rosario de Rengo, en la región de O´Higgins. En el caso de los pórfidos de cobre – molibdeno de Chile Central, a diferencia de los yacimientos equivalentes de la franja de mega pórfidos del norte de Chile, solamente molibdeno representa un sub producto relevante, las concentraciones de oro muy bajas para efectos de representar un sub producto rentable. La posible ocurrencia de otros subproductos de importancia no se ha estudiado en detalle o no está descrita en la literatura. No obstante no se descarta la posible ocurrencia de elementos / minerales de potencial interés económico, Co y Mn no evaluados.

Cabe destacar que al este de la franja de mega pórfidos de cobre – molibdeno de Chile Central se han explotado yacimientos de vetas con mineralización de cobalto y cobre, estos en el sector del El Volcán y Alto Río Maipo, región Metropolitana. Más al sur, en el valle del Alto Maule, se han descrito yacimientos de vetas con mineralización de cobre, con altas concentraciones de cobalto, no existiendo eso si datos concretos al respecto. En ambos casos se desconoce la edad de estos yacimientos, la roca huésped correspondiente a secuencias de rocas estratificadas del Mesozoico.

Si bien los principales y más relevantes yacimientos minerales en Chile ocurren desde Chile Central al norte, cabe mencionar que existe una diversidad de yacimientos metálicos hacia el sur del país. En la región de Los Lagos se han descrito yacimientos de carácter polimetálico, impronta metalogénica que es incluso mayor en la región de Aysén. En dicha región se han explotado yacimientos del tipo skarn de zinc – plomo (Zn, Pb, Cu, Au y Ag), y yacimientos del tipo vetas epitermales de metales preciosos (Au-Ag), el primer tipo en los distritos El Toqui y Puerto Cristal, el segundo tipo en el distrito Cerro Bayo. En la región de Aysén la ocurrencia de yacimientos polimetálicos de vetas es común, con concentraciones altas de Au-Ag-Zn-Pb-Cu, no evaluadas por otros elementos. Existen relaves importantes de todos estos yacimientos, también sin evaluar. Más al sur, en la región de Magallanes, los ambientes tectónicos y magmáticos son muy distintos al resto de Chile, existiendo en esta región, hacia la frontera con Argentina, una secuencia de rocas denominadas faja de rocas verdes. En estas existen ocurrencias minerales del tipo polimetálicas, interpretadas como sulfuros masivos de fondo marino o bien como yacimientos del tipo orogénico en zonas de cizalle y sutura, esto en una cuenca de expansión de fondo oceánico abortada. Entre los yacimientos explotados y actualmente en evaluación se puede mencionar Cutter Cove. Si bien no hay antecedentes publicados de este yacimiento, corresponde a una ocurrencia de mineralización de carácter polimetálico, en el cual no se ha evaluado la ocurrencia de Co y/o Mn.

2. Tipos de yacimientos en Chile con potencial por Cobalto

De acuerdo con la evolución metalogénica de Chile se describe brevemente aquellos ambientes metalogénicos en los cuales pudiesen existir recursos minerales con potencial por cobalto, ya sea como yacimientos en los cuales se presente como mena primaria, como potencial subproducto de una explotación primaria en los cuales cobalto pudiera representar un crédito de producción. Finalmente se hace una revisión de posibles fuentes de cobalto como ocurrencias minerales / geoquímicas en depósitos de relaves.

2.1. Yacimientos de potencial mena primaria por Cobalto

De acuerdo a la literatura y registros históricos en Chile, si bien se han explotado yacimientos con mena primaria por cobalto, estos corresponden a distritos muy acotados en los cuales se describe la ocurrencia y explotación pasada de cobalto junto con cobre. Entre estos se encuentran yacimientos del distrito San Juan y Carrizal Alto, estos en las cercanías de la ciudad de Huasco, región de Atacama. En estos distritos la mineralización se presenta en sistemas de vetas de cuarzo, la mineralización de cobalto principalmente en forma de sulfosales (cobaltita), con un horizonte superior oxidado, con ocurrencias de eritrina (arsenato de cobalto). Los cuerpos de vetas se encuentran hospedados en rocas metamórficas de edad Paleozoico a Triásico y en rocas intrusivas del batolito costero. Las actividades de explotación de cobalto en este distrito han estado largamente cerradas, la faena histórica más relevante, La Cobaltera, solamente un atractivo turístico por sus ruinas. Cabe destacar que en los entornos del distrito existe aun actividad minera de pequeña minería, la que explota mineral oxidado de cobre, material que se envía a la planta de beneficios de ENAMI en Vallenar.

Más al sur, en la región de Coquimbo, otro importante productor histórico de cobalto fueron los yacimientos de cobre y cobalto del distrito Tambillos – Minillas. En este distrito ocurren cuerpos de vetas, menores brechas y cuerpos mantiformes con mineralización de sulfuros de cobre y sulfosales de cobalto (cobaltita). En niveles oxidados superiores predomina mineralización secundaria de cobre, con solamente escasas ocurrencias de eritrina. En Tambillos existe actual explotación, pero centrada en cobre como mena principal, sin información respecto de recuperación de cobalto. Dada la explotación actual y pasada orientada a la recuperación de cobre, es de potencial interés evaluar la ocurrencia de cobalto en los relaves de este distrito.

Otra ocurrencia mineral de la cual existen antecedentes históricos de explotación por cobalto como mena primaria corresponde a yacimientos de vetas ubicados en los sectores de El Volcán y Alto Río Maipo, estos tratándose de sistemas de vetas de pequeñas dimensiones, con potencias que en promedio no superan los 30 cm.

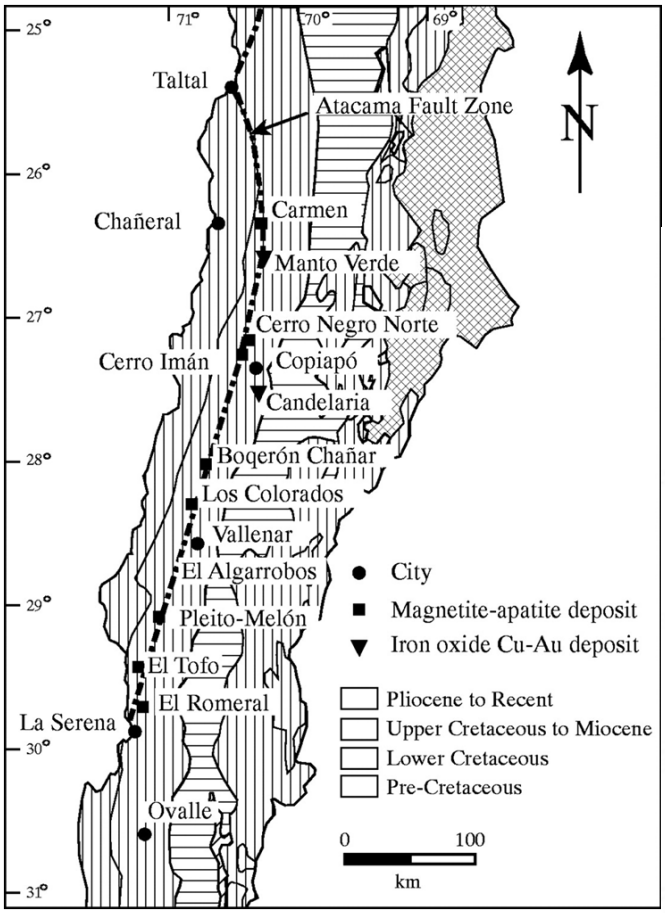
Los distritos documentados en la región de Atacama y Coquimbo se asocian espacial y temporalmente con la faja ferrífera de Chile, ligados a la evolución del arco magmático del Cretácico Inferior y de afinidad con los yacimientos del tipo óxidos de hierro-cobre oro y en menor medida con los yacimientos del tipo óxidos de hierro apatito. En el caso de los sistemas de veta en la zona del Alto Maipo en la región Metropolitana no es conocida la edad de mineralización, por lo que no se cuenta con información que permita definir la relación metalogénica de estos yacimientos con la evolución tectónica y magmática de Chile Central. Estos yacimientos no son de afinidad con la franja de pórfidos cupríferos ubicados al oeste de estos distritos.

En la actualidad los yacimientos descritos pudieran presentar algún potencial remanente por cobalto como mena primaria, pero esto requiere de evaluación en profundidad. De acuerdo a antecedentes existentes en el distrito San Juan, la explotación pasada llegó cercana a los 100 m de profundidad, por lo que una exploración mediante perforación a niveles más profundos pudiera levantar recursos no explotados. En Tambillos la situación es similar, eso si las actuales explotaciones por cobre han profundizado, no existiendo información pública respecto de

potencialidad por cobalto. En ambos distritos, y pudiéndose agregar el distrito Carrizal Alto, existiría aun potencial exploratorio remanente para efectos de la búsqueda de yacimientos con mena primaria por cobalto.

2.2. Yacimientos con potencial por Cobalto como subproducto

En base a la evolución metalogénica del margen Andino en Chile y la afinidad de cobalto con hierro y arsénico, esto en ambientes hidrotermales de baja sulfuración, los principales yacimientos minerales metálicos a los cuales se pudiera asociar la ocurrencia de cobalto como un sub producto o crédito relevante correspondería en primer lugar a yacimientos del tipo óxidos de hierro-cobre oro (IOCG), estos ocurrentes en la franja metalogénica del Cretácico Inferior (Fig. 2.1). Los yacimientos La Candelaria y yacimientos en el distrito Punta del Cobre pudiesen representar un blanco de evaluación. En estos yacimientos si bien no se reporta recuperación de cobalto como sub producto o crédito de operación, dado el tipo de yacimiento y mineralización pudiese existir un potencial no evaluado. Otro yacimiento de este tipo corresponde a Manto Verde, localizado al este de Chañaral, hospedado en el Sistema de Fallas de Atacama (SFA), también un yacimiento en el cual no se reporta recuperación de cobalto, pero donde no es descartable su ocurrencia.



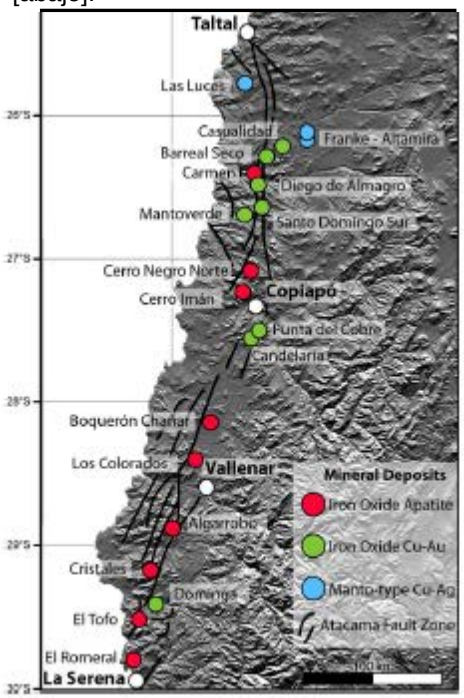


Figura 2.1. Distribución espacial de yacimientos del tipo IOA (magnetita – apatito) e IOCG (óxidos hierro-cobre oro) en la franja ferrífera de Chile, arco magmático Cretácico Inferior. Tomado de Mathur et al. (2002) [izquierda] y modificado de Barra et al. (2017) [abajo].

Otros yacimientos en los cuales pudiera estar presente cobalto como un potencial sub producto o crédito correspondería a los yacimientos del tipo óxidos de hierro-apatito (IOA), estos la principal fuente de hierro en Chile. Estos yacimientos se distribuyen a lo largo del SFA entre las regiones de Atacama y Coquimbo (Fig. 2.1), los principales yacimientos en explotación siendo Los Colorados, El Algarrobo y El Romeral. Si bien la mayor probabilidad de ocurrencia de minerales de cobalto se asocia a los yacimientos del tipo IOCG e IOA, no se debe descartar la posible ocurrencia de minerales de cobalto asociados con pórfidos cupríferos. Dado que la afinidad del cobalto en sulfuros ocurre con arsénico, y que este elemento es un castigo en los concentrados de cobre, se recomendaría evaluar las concentraciones y posible ocurrencia mineral de cobalto en este tipo de yacimientos. Si bien las concentraciones pudieran ser bajas, dependiendo de la ocurrencia mineral y asociación con la mineralización de cobre o molibdeno, de ser recuperable el cobalto en el mismo proceso metalúrgico, similar a lo que ocurre con oro, cobalto pudiese representar un crédito interesante a la producción. Otros tipos de yacimientos en los cuales pudiera existir ocurrencia de cobalto son yacimientos de polimetálicos de metales base, por ejemplo yacimientos de vetas y skarn en la región de Aysén, o yacimientos de sulfuros masivos en la región de Magallanes. No existen antecedentes al respecto, pero tratándose de yacimientos no convencionales en Chile es poco lo que se sabe respecto de estos.

2.3. Relaves con potencial por Cobalto

En Chile existe un alto número de depósitos de relaves, estos generados por la industria minera durante ya más de 100 años de explotación de yacimientos, tanto de la pequeña, mediana y gran minería. Esta última, en la actualidad, genera enormes volúmenes anuales de pasivos ambientales, estos escasamente evaluados por sus potenciales como activos mineros. En el caso del elemento cobalto, los minerales que potencialmente lo contienen no son recuperados en procesos mineros por cobre, oro o hierro, pasando junto con la ganga a los depósitos de relaves. En el caso de los minerales sulfurados y sulfosales de cobalto, al igual que la pirita, pirita arsenical y arsenopirita, estos minerales serían concentrados en el relave. Dado que en la mayoría de los yacimientos Chilenos, sean de cobre, oro, hierro o combinaciones, se desconoce la ocurrencia de cobalto, es difícil en una primera instancia determinar si este elemento pudiera constituir un elemento de potencial interés, mucho menos si de estar presente, es recuperable metalúrgicamente.

A la fecha existen estudios en curso que buscan determinar los potenciales elementos / minerales de interés económico y estratégico que pudieran estar contenidos en relaves. Un estudio del estado del arte de relaves en Chile, en el cual se ha empleado valiosa información de Sernageomin que describe concentraciones geoquímicas multi elementos de relaves Chilenos permite una primera aproximación respecto de aquellos que pudieran representar algún potencial por cobalto. De acuerdo a dicho estudio (Caraballo et al., 2017) las máximas concentraciones reportadas se encuentran en muestras de cubetas de los depósitos Delirio 3 de Punitaqui, región de Coquimbo, con 190 ppm Co, María Isabel (98 ppm Co), en la comuna Tierra Amarilla, y Filtrados de Potrerillos en la comuna Diego de Almagro (88 ppm Co), ambos ubicados en la región de Atacama.

Según el tipo de yacimiento de origen, existe una amplia variedad de minerales en los cuales el Co puede estar presente. Los grupos más comunes son los sulfuros, sulfosales, arseniuros y óxidos.

Puede sustituir a metales de transición como el Fe y Ni en algunos minerales. El Co es casi siempre encontrado como sub o co-producto de la minería de otros metales base, principalmente del Cu y Ni. Por lo tanto, en el caso de Chile se espera que esté asociado a los principales yacimientos del país en los cuales se extrae Cu, principalmente a los de alto contenido de sulfuros. Las leyes típicas de Co asociados a los yacimientos de sulfuros magmáticos - hidrotermales es 0,1% (British Geological Survey, 2009). El máximo valor de concentración de Co determinado en los depósitos de relaves en Chile es de 0,019%, concentraciones que son muy bajas para ser consideradas de interés económico por si solo. No obstante, si se considera que actualmente existen depósitos de relaves que se explotan y reprocesan por otros elementos, principalmente cobre, se abre la oportunidad de evaluar la recuperación de cobalto como un sub producto. Cabe mencionar también que en el estudio de Sernageomin, en la mayoría de los relaves se obtuvo solamente una muestra de cubeta, esta de superficie, a profundidades no superiores a 2 m.

De lo anterior se indica entonces que las bajas concentraciones de cobalto en relaves Chilenos no es una determinación concluyente, sobre todo si se considera que los sulfuros y sulfosales asociados con cobalto son del alto peso específico, con tendencia a segregación gravitacional en transporte y depositación a ambientes profundos. Por otra parte, en el caso de relaves antiguos, los minerales de sulfuro y sulfosales han sido sometidos a oxidación, hidrólisis y posibles procesos de lixiviación y reconcentración de cobalto en ambientes oxidantes, similar a los procesos de enriquecimiento observados para cobre.

3. Tipos de yacimientos en Chile con potencial por Manganeso

De acuerdo con la evolución metalogénica de Chile se describe brevemente aquellos ambientes metalogénicos en los cuales se han documentado y explotado recursos minerales por manganeso. Adicionalmente se hace una revisión de posibles fuentes de manganeso como ocurrencias minerales / geoquímicas ya sea como posibles subproductos o bien contenidos en depósitos de relaves.

3.1. Yacimientos de mena primaria por Manganeso

Los yacimientos de manganeso en los cuales se ha desarrollado explotación industrial se encuentran distribuidos principalmente en la región de Coquimbo, y en menor medida la región de Atacama. Los yacimientos de mayor relevancia económica corresponden a depósitos mantiformes de origen sedimentario - volcánico, con ocurrencia también de cuerpos vetiformes de tipo epitermal. Estratigráficamente estos depósitos ocurren hospedados en dos unidades litológicas principales, denominadas Formación Arqueros y Formación Quebrada Marquesa en la Región de Coquimbo, y en las unidades litológicas equivalentes en la Región de Atacama.

Los yacimientos más importantes se hospedan en rocas de la Formación Quebrada Marquesa, los distritos mineros más relevantes en esta siendo aquellos que presentan las mayores perspectivas para la exploración de recursos remanentes o no descubiertos de este mineral. El distrito más importante históricamente ha sido Corral Quemado, tanto por producción como calidad. Le siguen los distritos Arrayán y Fragua, y en importancia decreciente, los distritos Las Cañas, Talcuna y Arqueros, ubicados también en la región de Coquimbo, y los de

Sierra La Bandera al norte de Freirina, en región de Atacama. Estos distritos se describen más adelante en este informe.

En una perspectiva de ambientes geológicos de formación este tipo de yacimiento se asocia con unidades de roca sedimentarias – volcánicas propias de cuencas de ante, intra y tras arco, estos mejor desarrollados en Chile durante el Jurásico Superior y Cretácico Inferior en el norte y sur del país. Como blanco de exploraciones mineras esta se debiera orientar a ambientes geológicos en los cuales se presentan secuencias estratificadas de rocas sedimentarias y volcánicas mesozoicas. Dado que el mineral de manganeso nunca ha sido de gran relevancia económica en Chile y que por otra parte las necesidades de producción interna y de exportación se satisfacían con los distritos conocidos en la región de Coquimbo y en menor medida Atacama, las exploraciones por este recurso han sido escasas. No obstante existe potencial, dado la amplia ocurrencia de los ambientes geológicos adecuados a la formación y génesis de estos yacimientos.

3.2. Otras posibles fuentes de Manganeso

Un proyecto relevante de explotación y potencial producción de manganeso fuera de las regiones de Coquimbo y Atacama corresponde al proyecto minero Los Pumas, este ubicado en la región de Arica y Parinacota, comuna de Pútre, a unos 175 km al NE de Arica y a unos 35 km al NNW de la localidad de Putre. El Proyecto “Manganeso Los Pumas”, cuyo titular es Minera Hemisferio Sur S.C.M. (MHS), consiste en la propuesta de explotación y beneficio de un yacimiento de manganeso (Mn), con el fin de producir concentrado de Mn para su venta en los mercados internacionales. En el yacimiento Los Pumas se han estimado 18,3 millones de toneladas de reservas indicadas con ley de corte 7,8% Mn, y más de 5,4 millones de toneladas de reservas inferidas. El mineral se propone para explotación a tajo abierto, desde 3 operaciones simultáneas, y procesado en una planta de beneficio mediante operaciones de chancado, molienda y separación por medios densos. De este modo se propone producir del orden de 400 mil toneladas al año nominales de concentrado, los cuales serian transportados en camiones de 30 toneladas hasta un sitio de acopio en la zona industrial de Arica. Este proyecto minero se encuentra detenido a la fecha, esto por revocación de los permisos ambientales y un fuerte rechazo de las comunidades locales.

En la misma región y a 175 Km de la ciudad de Arica, se describe en la página web de la empresa CAMIN Ingeniería y Explotación Minera (http://www.camin.cl/proyectos-mineros/proyecto-manganeso/) el proyecto minero Mar y Cielo. Se cita a continuación textualmente la información presentada, indicándose eso si que en esta información no se menciona la localidad exacta del yacimiento y tampoco las características geológicas detalladas de este.

Proyecto Minero Mar y Cielo (CAMIN)

“Resumen Ejecutivo: El Proyecto minero Mar y Cielo tiene como objeto la explotación de mineral de manganeso a cielo abierto, su concentración en una planta de beneficio y la exportación del concentrado de Mn resultante a través del puerto de Arica en dos etapas, la

primera etapa comenzará su producción en un plazo de 6 meses de recibido el capital de inversión de diez millones de dólares, la segunda etapa contempla la construcción de una planta concentradora, una planta de energía solar y una estación de ferrocarril que demandará una inversión aproximada de ciento ochenta millones de dólares, el valor de la planta solar es de US$ 110 millones. Los estudios realizados por Minera Mar y Cielo han definido la existencia de recursos de mineral de Manganeso que exceden los 600 millones de toneladas (Mt), con una ley promedio de 47% de Mn. El Proyecto Mar y Cielo ha configurado un Plan Minero con una tasa de extracción del orden de 220.000 Toneladas de mineral por mes y exportar aproximadamente 1,3 millones de toneladas por año (Mt/a) de concentrado de Mn. Lo anterior significará una vida útil de 22,8 años aproximadamente con las actuales exploraciones que son menores al 30% del total de la concesión minera."

"Complejo Minero: El Complejo Minero está localizado en la Región de Arica y Parinacota, a 175 km de Arica. Las campañas de exploraciones han permitido establecer que la mineralización de manganeso se encuentra presente en una longitud de 3,0 kilómetros, con anchos de hasta 700 metros. El cuerpo mineralizado se puede caracterizar como cuerpo tabular superficial de alta ley in-situ, lo que favorece la explotación mediante métodos convencionales de rajo abierto, con profundidades entre 20 y 30 metros. Las campañas de exploraciones han permitido estimar hasta el momento recursos potenciales del orden de 60,4 millones de toneladas, con un contenido aproximado de 40 a 51% Mn en solo 360 Ha de las 1.200 Ha que aún faltan explorar. Las principales instalaciones que conformarán el Proyecto serán: Rajo Mina, Botaderos de estéril, Planta de procesos (chancado y concentración), Botadero de material de rechazo, Depósito de lamas, Infraestructura de apoyo en faena e instalaciones para el acopio de concentrado y carguío en Arica. El Proyecto contempla las siguientes actividades principales:

- Explotación de minerales mediante técnicas convencionales de rajo abierto, a una tasa de extracción del orden de 220.000 toneladas de mineral mensual. El trasporte de material extraído en la mina (estéril o mineral) se realizará mediante camiones con capacidad de carga de 50 toneladas. El material estéril será transportado hasta los botaderos de estéril para su disposición final, mientras que los minerales serán transportados hasta el alimentador del chancador primario. La velocidad promedio de los camiones será de 22 km/h, tanto cargados como descargados.
- Disposición de material estéril en botaderos. Durante la ejecución del Proyecto, se construirán un total de dos botaderos para la disposición final del material estéril. Estos botaderos tendrán una capacidad total de almacenamiento de hasta 30 millones de toneladas de estéril.
- Preparación mecánica de los minerales, consistente en la reducción de tamaño mediante una planta de chancado en tres etapas, operada en circuito cerrado.
- Concentración de los minerales mediante métodos de separación por medios densos.
- Eliminación de la fracción fina mediante lavado. Las partículas extra finas removidas del proceso mediante harneado, serán espesadas para recuperar el agua para reutilización, y posteriormente almacenadas en un depósito permanente de lamas.
- Transporte del producto final mediante camiones hasta un acopio temporal en mina, a la espera de ser embarcado vía ferrocarril hasta su destino final."

De acuerdo a lo descrito por esta empresa este yacimiento y distrito sería el mayor potencial conocido en Chile por manganeso, de un origen seguramente sedimentario – volcánico no distinto a lo conocido en los distritos de las regiones de Coquimbo y Atacama.

No obstante lo anterior, es necesario levantar mayor información de estos proyectos descritos en la región de Arica y Parinacota y en particular la viabilidad real de explotación, conjuntamente con las características geológicas.

3.3. Potencial por manganeso en relaves de la minería Chilena

La producción de manganeso en Chile proviene exclusivamente de la Región de Coquimbo y es efectuada por pequeñas y medianas empresas del rubro. Desde el año 2010 no se registra producción (CAMCHAL, 2015).

Se conocen más de 150 minerales de Mn, los principales minerales de mena son (Mn en %): Pirolusita MnO_2 (55-63), Braunita Mn_2O_3 (60-69), Gausmanita $Mn.Mn_2O_4$ (65-72), Manganita MnOOH (50-62), Vernodita $MnO_2.nH_2O$ (40-45), Psilomelano $MnO.MnO_2$ (40-60), Rodocrosita $MnCO_3$ (40-45), Manganocalcita $(Ca,Mn)CO_3$ (7-23) y Manganosiderita $(Mn,Fe)CO_3$ (23-32) (Vasallo, 2008). De acuerdo a a los tipos de yacimientos de posible origen, se han reportado minerales de manganeso en yacimientos epitermales de metales preciosos, en pórfidos cupríferos, y en estratoligados de Cu, tratándose de minerales como pirolusita, rodocrosita, braunita y manganita. Dado que estos minerales son ganga en todos estos yacimientos, terminan finalmente en los relaves de la gran, mediana y pequeña minería.

Las leyes mínimas de explotación para menas fácilmente concentrables en yacimientos primarios de manganeso son de más de 10% y para menas de difícil concentración más de 20% (Vasallo, 2008). En una revisión del estado del arte de relaves en Chile (Proyecto CORFO Valorización de Relaves) y basado en las bases de datos geoquímicas de relaves publicadas por SERNAGEOMIN, el depósito el Zorrito de la Comuna Petorca, ubicado en la región de Valparaiso, presenta una concentración de 6,74% de MnO. Es un depósito activo con una masa de tonelaje máxima de 72.000 t. Al comparar esta concentración con las leyes mínimas de explotación de Mn, se determina que a pesar de que se encuentra por debajo de lo establecido, sería interesante evaluar el potencial de extracción de este elemento, tomando en cuenta que la roca ya se ha sometido a molienda y por lo tanto solamente se requiere determinar la ocurrencia mineral del manganeso y la viabilidad metalúrgica de recuperación.

Si bien no se destacan otros relaves en Chile con altas concentraciones de manganeso, la ocurrencia de óxidos e hidróxidos de manganeso en los yacimientos de cobre y oro del país debiese ser examinada como una potencial fuente secundaria de este metal, tratándose de un subproducto cuya recuperación se pudiera evaluar en la cadena principal de producción, o bien su recuperación, conjuntamente con otros minerales / elementos de valor desde depósitos de relaves.

4. Selección y descripción de Distritos de explotación histórica y/o con potencial para explotación de Co y Mn

4.1. Distritos por Cobalto

La explotación histórica de cobalto en Chile se desarrolló, de manera intermitente, entre los años 1844 y 1944. Las zonas explotadas incluyen el distrito de Tambillos en la región de Coquimbo, los valles del río Maipo y río El Volcán en la región Metropolitana, el distrito San Juan, al sur de Freirina y los distritos Sierra Ladrillos y Los Loros en Copiapó (D'Aubarede, 1969; Cruzat, 1968).

Los distritos que fueron objeto de un mayor desarrollo, corresponden a los distritos San Juan y Tambillos. Adicionalmente existen una serie de depósitos ampliamente distribuidos en el ámbito de la provincia metalogénica de la Cordillera de la Costa, en las regiones de Atacama y Coquimbo, con valores de cobalto similares a los reportados en las zonas hipógenas de depósitos del distrito San Juan, al sur de Freirina (Lacassie et al., 2016).

4.1.1. Distrito San Juan

Se accede a esta zona por la ruta que conecta la ciudad de Freirina con el sector de Quebradita. De acuerdo a lo reportado por Geoexploraciones (1983) el distrito San Juan cubre un área de elongación NE de 5x10km, que contiene 118 depósitos vetiformes agrupados en los Minerales Fraguita, El Romero, Cobaltera, Quebradita y Labrar (Fig. 4.1).

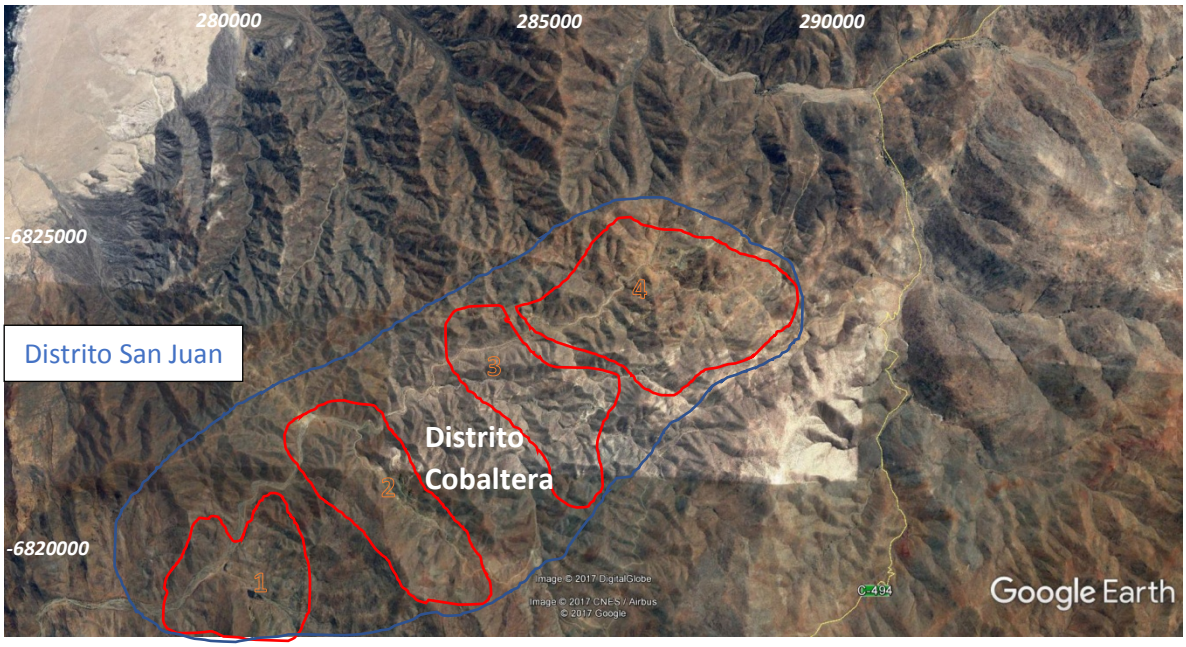


Figura 4.1. Mineral de Labrar (1), Quebradita (2), El Romero (3), Fraguita y distrito La Cobaltera en el contexto del Distrito San Juan, según Geoexploraciones 2003.

Las vetas de este distrito se alojan tanto en rocas del Basamento Paleozoico (**Psm**; Fig. 4.2), como en las rocas intrusivas que cortan el basamento (**Jmsg, Kig**; Fig. 4.2). Generalmente están asociados a diques y fallas de dirección general NE cuando se encuentran en el Basamento y a

diques y fallas de orientación NW y NNE cuando están albergadas en las rocas intrusivas. El basamento consiste principalmente en metareniscas cuarcíferas, metapelitas, esquistos cuarzo – micáceos y metabasitas; los intrusivos incluyen dioritas cuarcíferas de anfíbola y biotita que varían a monzodioritas cuarcíferas de anfíbola y biotita, consignadas en la unidad diorita cuarcífera San Juan (ca. 174 Ma, Welkner et al., 2006, **Jmsg**; Fig. 4.2). El conjunto de rocas antes descrito está intruída hacia el oeste, por rocas plutónicas del Complejo Plutónico Infiernilllo (131-129 Ma, **Kig**; Fig. 4.2), siendo el contacto, una zona de milonitas que pertenece a una rama occidental del Sistema de Falla de Atacama (SFA), desarrollada tanto en el basamento, como en las rocas intrusivas, con la excepción de la diorita cuarcífera San Juan, en donde no se aprecian las milonitas. En términos estructurales, el basamento metasedimentario presenta deformación polifásica de intensidad variable (Fig. 4.2).

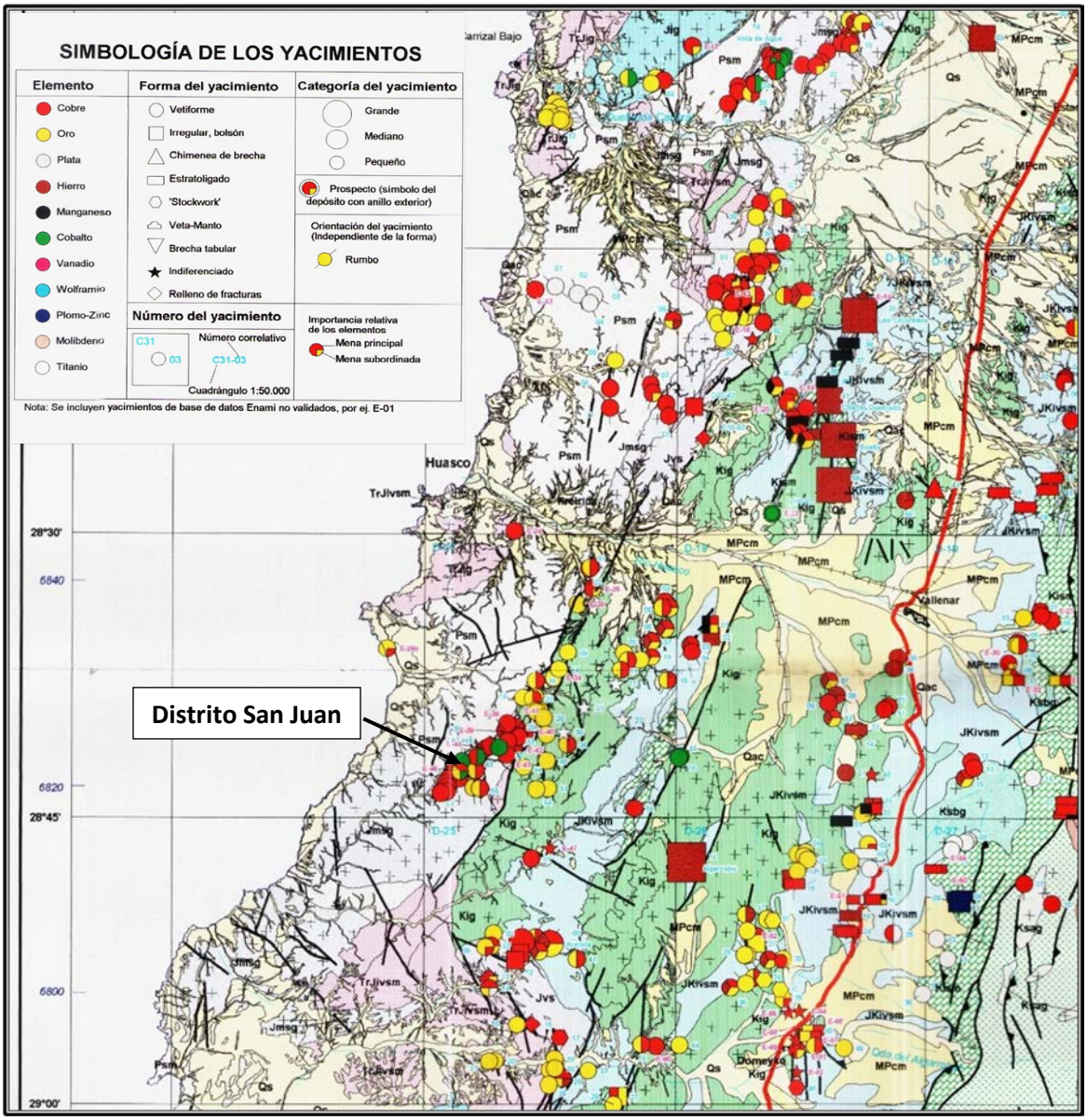


Figura 4.2. Contexto geológico distrito San Juan (tomado de Vivallo et al., 2008).

Las vetas tienen orientaciones variables NS (+-10°), N25-50E (ocasionalemente N70E-EW) y N40W, los manteos oscilan desde subverticales hasta 50°W, presentan en general una potencia que varía entre 0,7 y 4.0 m y corrida desde 80 m hasta 1000m. La mineralogía de mena primaria consiste de pirita, cobaltita, pirrotina, calcopirita y escutterudita, mientras que, en la zona oxidada de aproximadamente 30 m de desarrollo vertical, se puede observar la presencia de crisocola, malaquita, azurita, antlerita, eritrina y óxidos negros de cobalto. La mineralogía de ganga está constituida por la presencia de turmalina, calcita y cuarzo. Normalmente la alteración de la roca de caja consiste de turmalina y cuarzo (sericita) (Vivallo et al., 2018; Geoexploraciones, 1983; Díaz, 1981).

Los resultados de análisis químicos de muestras de mena hipógena en demontes, picados y vetas en el distrito San Juan muestran contenidos de cobalto que varían entre 0,001% y 1,95%. Presentan también contenidos variables de cobre (7,9% - 0,037%), oro (1,1 g/t a 0,1 g/t), plata (8,8 g/t a 0,5 g/t), níquel (0,49% a 0,023%) y cadmio (4,7 g/t a 0,023 g/t) (Geoexploraciones, 1983).

Geoexploraciones recomendó 2 zonas favorables para la exploración y desarrollo de minas para la explotación de cobalto, las que en orden de importancia corresponden a (Fig. 4.3):

Zona 1

Incluye los sectores Cortadera, Paulita, Verde y consiste de un área de 2 x 4 km, en donde los análisis de cobalto indican valores sobre 0,5%. Las minas recomendadas para realizar estudios detallados de interior mina y superficie son Cobaltera, Prosperidad, Blanca, Verde, Lea, Delirio y Rosa Amelia.

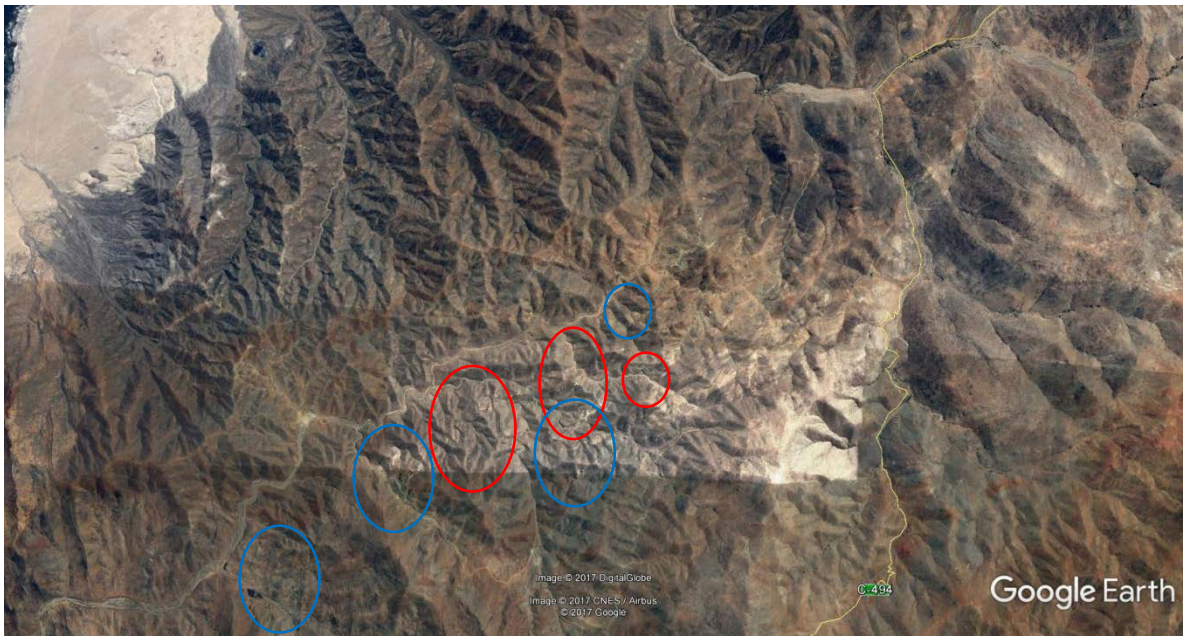


Figura 4.3. Ubicación aproximada zonas de interés 1 (en rojo) y 2 (en azul) en el distrito San Juan.

Zona 2

Incluye los sectores Labrar, Quebradita Norte, Romero 2, Fraguita (Fig. 4.3) y consiste en un área donde los análisis de cobalto indican valores entre 0,1 y 0,5%.

Recursos Mineros

Geoexploraciones (1983) indica reservas de 1300 t de mineral in situ y 3960 t de desmontes de 1% Co en la Zona 1 y 62000 t de desmontes de la mina Santa Rosa (Zona 2) con aproximadamente 0,05 a 0,24% Co y con una ley media de 2,44% de Cu, el que debía ser muestreado y cubicado.

Recursos adicionales del orden de 500.000 tm de relaves con 0,11% de Co y 0,23% de Cu son reportados por Cía. Minera Santa María de Astillas (INTEC, 1988) en el distrito Astillas, al norte de la ciudad de Freirina. Otros relaves en las proximidades de Freirina con valores de Co en muestras superficiales puntuales de las cubetas con 221 mg/kg – 358 mg/kg y en la zona de Capote aurífero 80305 t con valores de Co de muestras superficiales puntuales de las cubetas de 325 mg/kg y 426 mg/kg.

4.1.2. Distrito Tambillos

Se encuentra en la comuna de Andacollo, aproximadamente a 33 km al sur de la ciudad de La Serena y cubre una superficie de aproximadamente 40 km 2. Se accede al distrito por la ruta que conecta la ciudad de La Serena con la ciudad de Ovalle. El distrito Tambillo está contenido del dominio metalogénico Arqueros (D3A), definido en el ámbito del mapa de Yacimientos Metalíferos del Área de Andacollo – Puerto Aldea (Díaz et al., 2009) (Fig. 4.4).

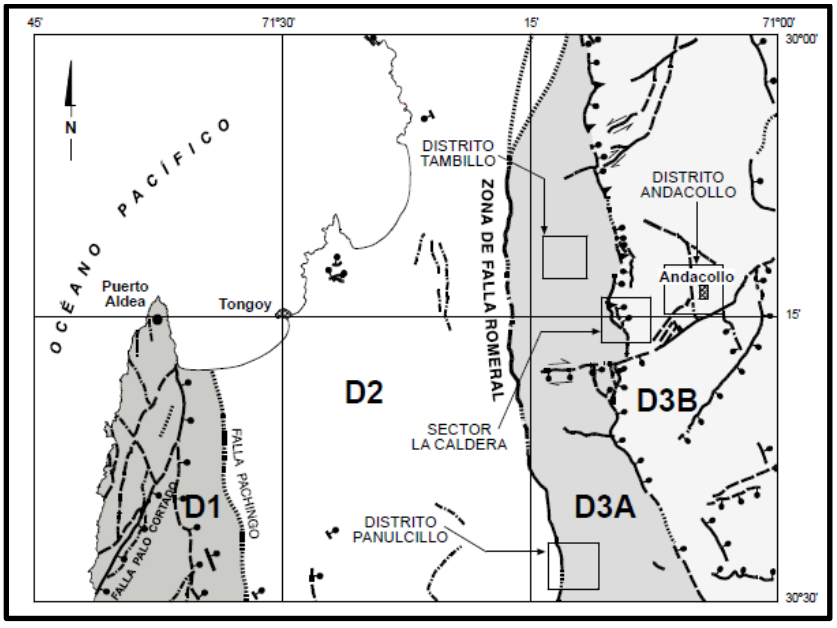


Figura 4.4. Contexto metalogénico distrito Tambillo (tomado de Díaz et al., 2009).

Los depósitos del distrito incluyen vetas del tipo IOCG, que se alojan tanto en rocas intrusivas del Cretácico Inferior (122-120 Ma, Kig1; Fig. 4.5) y cuerpos hipabisales del Cretácico Superior

temprano (**Ksbg**; Fig. 4.5), como en una secuencia estratificada volcánica y sedimentaria del Jurásico Superior – Cretácico Inferior (Formación Arqueros, **JKvs**; Fig. 4.5) y depósitos estratiformes del tipo IOCG contenidos en un mismo nivel litocronoestratigráfico, en la base de una secuencia volcánico-sedimentaria típica de la Formación Arqueros. La totalidad de las rocas y depósitos antes descritos se distribuyen al oeste del Sistema de Fallas Romeral (SFR) y han sido afectados por un intenso metamorfismo de contacto asociado al emplazamiento de granodioritas, granitos y dioritas (122 – 120 Ma, **Kig1**; Fig. 4.5) ubicados en la zona central del distrito. Las rocas volcánicas incluyen la presencia de andesitas basálticas, hialoclastitas y peperitas. Sobre las andesitas y de manera concordante se disponen anfibolitas sobreyacidas por granatitas en parte brechosas que hospedan, en conjunto, la mineralización estratiforme por decenas de kilómetros de extensión. Por sobre el nivel con anfibolitas y granatitas mineralizadas, se observa un nivel de rocas silicificadas, cuyo protolito corresponde a calizas y areniscas subordinadas con intercalaciones de chert, lutitas y tobas. La secuencia antes descrita se encuentra intruida por una serie de diques afaníticos, afíricos, ocoitas y cuerpos hipabisales andesítico – basálticos del Cretácico Inferior Tardío – Cretácico Superior Temprano. Los depósitos explotados por cobalto corresponden a los del tipo estratiforme, específicamente a las minas Buitre y Minillas. Estos mantos mineralizados presentan rumbo N15-35W y manteos entre 45 y 55W. El manto consiste en una roca córnea de actinolita y calcita recristalizada escasa, junto a abundante clorita intersticial. La caja yacente corresponde a metandesitas, las que generalmente tienen sobreimpuesta una alteración potásica definida por la presencia de biotita y feldespato potásico, mientras que la caja pendiente está constituida por capas continuas de chert. La mineralogía de mena primaria presenta calcopirita, pirita, arsenopirita, esfalerita, galena, cobaltita y tetrahedrita, además de pequeñas cantidades de eritrina en las zonas de oxidación superficial. La cobaltita se describe principalmente en la zona de contacto entre el manto mineralizado y la caja pendiente (chert) y en menor medida como diseminación gruesa al interior del manto, junto a los otros sulfuros mencionados.

El yacimiento con mayor desarrollo, con relación a la explotación de cobalto está representado por la mina Buitre, la que en 1975 tenía tres niveles de desarrollo separados en cota, cada 20 m. El nivel superior contenía un socavón de 200 m de alto, 4 m de ancho y una altura de 30 m. El nivel superior se encontraba en explotación a partir de un socavón de 170 m de extensión, 4 m de ancho y una altura de 15 m. El nivel intermedio consistía en un socavón de 50 m de extensión y el nivel más profundo, poseía un socavón que alcanzaba 30 m de largo. Se estimaba en esa época que la ley media de Co estaba en torno al 1% y los disfrutes tenían una ley media de 0,46% Co. La mina Minillas, contigua a la mina Buitre, presenta las mismas características de esta y en la actualidad está en preparación para la explotación de zonas de minerales oxidados de cobre, remanentes. La única mina en producción a escala de mediana minería corresponde a la mina Florida, contigua a las minas Buitre – Minillas y presenta características similares. Se explota actualmente para recuperación principalmente de cobre. Este material se procesa en una planta dentro del distrito y ha generado un gran volumen de relaves.

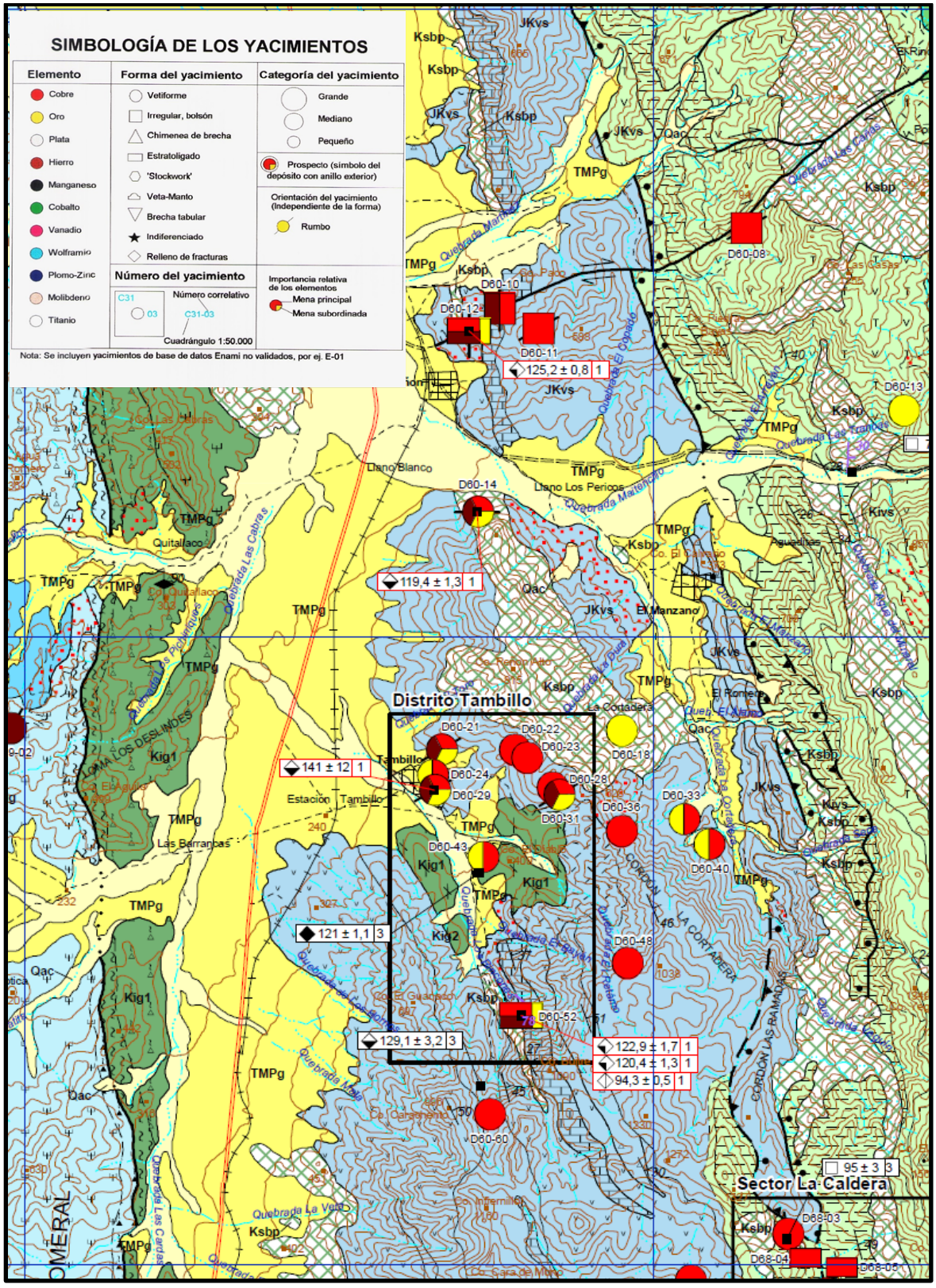


Figura 4.5. Contexto Geológico Distrito Tambillos (tomado de Díaz et al., 2009).

Los depósitos presentes en la porción norte del distrito corresponden a vetas de orientación preferencial N60E/80SE cuya corrida alcanza hasta los 300 m, con potencia entre 0,4 y 1.0 m y profundidad no inferior a 300 m. La mineralogía de mena hipógena está indicada por la presencia de magnetita, pirita, arsenopirita, calcopirita, minerales oxidados de cobre, almagre y uraninita, en una ganga de fluorapatito, hidroxilapatito, magnesiohorblenda, riebeckita, tremolita, actinolita, epidota y cuarzo. Presentan zonas de alteración centimétricas, en torno a las vetas, con feldespato potásico (albita, calcita), turmalina, actinolita y cuarzo, además de clorita-vermiculita, montmorillonita-clorita, biotita, muscovita, goethita, maghemita y hematita. Los valores de cobalto en estos depósitos en las zonas más oxidadas, con presencia de limonita, jarosita y minerales oxidados de cobre tienen valores levemente superiores a 0,1% (1 muestra), mientras que en la zona hipógena son inferiores a 0,01% (5 muestras) (Díaz et al., 2010). Los depósitos presentes en la porción norte del distrito corresponden a vetas de orientación preferencial N60E/80SE cuya corrida alcanza hasta los 300 m, con potencia entre 0,4 y 1.0 m y profundidad no inferior a 300 m. La mineralogía de mena hipógena está indicada por la presencia de magnetita, pirita, arsenopirita, calcopirita, minerales oxidados de cobre, almagre y uraninita, en una ganga de fluorapatito, hidroxilapatito, magnesiohorblenda, riebeckita, tremolita, actinolita, epidota y cuarzo. Presentan zonas de alteración centimétricas, en torno a las vetas, con feldespato potásico (albita, calcita), turmalina, actinolita y cuarzo, además de clorita-vermiculita, montmorillonita-clorita, biotita, muscovita, goethita, maghemita y hematita. Los valores de cobalto en estos depósitos en las zonas más oxidadas, con presencia de limonita, jarosita y minerales oxidados de cobre tienen valores levemente superiores a 0,1% (1 muestra), mientras que en la zona hipógena son inferiores a 0,01% (5 muestras) (Díaz et al., 2010).

Recursos Mineros

No existe información actualizada en relación a los recursos y leyes para para las minas Buitre y Minillas. Se presume que los escasos desmontes debieran contener leyes de Co inferiores a 1%. El volumen de relaves presentes en el distrito, procedentes del procesamiento de los depósitos estratiformes de Tambillos, por Cia. Minera Florida, debieran tener concentraciones de cobalto aún por determinar. Las vetas de la zona norte del distrito Tambillo en la actualidad son objeto de exploración con el objetivo de estimar recursos mineros e incluye la determinación de los contenidos de cobalto. Al momento de la visita se encontraban desarrollando socavones de cortada de vetas en la mina Farellón y preparándose para el desarrollo de una campaña de sondajes (Andrés Encina, Comet Exploration; com. verbal).

4.1.3. Otros distritos de interés por Cobalto

El análisis mediante redes neuronales artificiales (RNA) de datos geoquímicos de muestras de mena y zonas de alteración de diversos depósitos metálicos distribuidos en la Provincia Metalogénica de la Cordillera de la Costa de la región de Atacama y de la región de Coquimbo, al norte del río Limarí, distingue 18 grupos de muestras que representan, cada uno, un tipo de yacimiento con características químicas específicas y de distinto orden. En particular destaca el grupo de yacimientos asociados a una señal de Ni-Co, de primer orden, en donde el valor medio de cobalto alcanza los 1242 ppm, además de 200 ppm de Ni, 2,2 % Cu y 585 ppm de Mo (Tabla 1; Lacassie et al., 2016). Otras señales con valores elevados de Co corresponden a las de Fe-P, Fe, Ca

y La - Ce (Tabla 4.1, Fig. 4.6). Normalmente este conjunto de señales se asocia a depósitos de hierro del tipo IOA, depósitos vetiformes e irregulares del tipo IOCG, depósitos vetiformes mesotermales de Cu-Au y representan varios eventos de mineralización ocurridos desde el Jurásico Inferior hasta el Cretácico Inferior. Estos ocurren en distintos ambientes geológicos controlados por el desarrollo de sucesivos sistemas de arco-trasarco en el ámbito de la Provincia Metalogénica de la Cordillera de la Costa y reflejan diferentes niveles de exposición asociados a niveles de erosión diferenciados, en este contexto.

Tabla 4.1. Concentración media de elementos distintivos de señales químicas de depósitos metálicos (tomado de Lacassie et al., 2016).

Señal	Elementos distintivos										
	Fe2O3	CaO	P2O5	Co	Ni	La	Ce	Au	Pb	Cu	Mo
Fe-P	32	8	**4,17**	262	80	**348**	**632**	991	33	18429	71
Fe	**57**	2	0,26	181	47	12	16	922	19	7669	58
La-Ce	19	6	0,20	151	42	104	165	1285	55	13944	24
Ni-Co	24	8	0,30	**1242**	**200**	112	167	1269	**753**	**22328**	**585**
Ca	15	25	0,13	168	41	18	29	1399	17	9497	10
Si	9	3	0,10	52	25	11	14	**2135**	29	5861	18
B	16	2	0,19	88	12	23	33	1059	202	10553	125

Estos depósitos se encuentran en parte en los distritos ya señalados y también en los distritos Sierra Santo Domingo (**Z1**) y Las Ánimas (**Z2**), descritos en el mapa de Yacimientos Metalíferos de Chañaral – Diego de Almagro (Gelcich et al., 1995); en los distritos Algarrobo – El Roble, Relincho, San Ramón – Zorroquina, Quebrada Seca, estos descritos en el mapa de Yacimientos Metalíferos de Caldera (Pizarro et al., 2003) (**Z3**); en el distrito Punta del Cobre, descrito en Yacimientos Metalíferos de la Hoja Copiapó (Díaz et al., 2006) y en el distrito Las Pintadas descrito en el mapa de Yacimientos Metalíferos de la Hoja Los Loros (Díaz et al., 1998) (**Z4**); en los distritos Descubridora de Quebrada Seca, Sierra El Tiuque, Totoral Norte y Quebrada Los Loros, Sierra La Noria y Sierra Algarrobilla, en el área descrita en las carta de Yacimientos de Castilla – Totoral Bajo (Jorquera et al., 2003) (**Z5**), y finalmente en los distritos Carrizal Alto, Astillas, Sierra La Bandera y sector de Quebrada del Medio al sur de Freirina (Vivallo et al., 2008) (**Z6**) (Fig. 4.7).

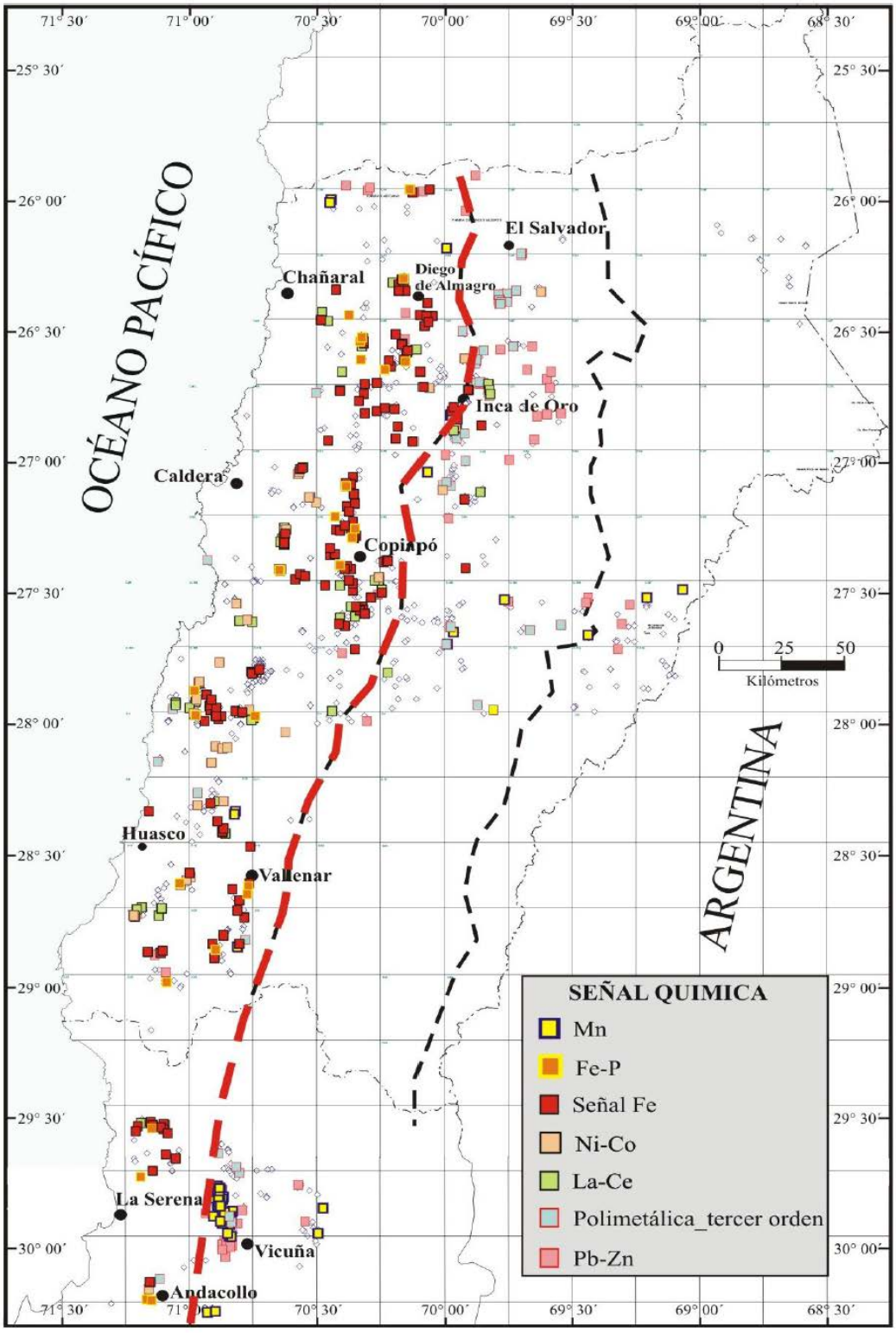


Figura 4.6. Distribución de señales químicas de distinto orden de depósitos metálicos (tomado de Lacassie et al., 2016).

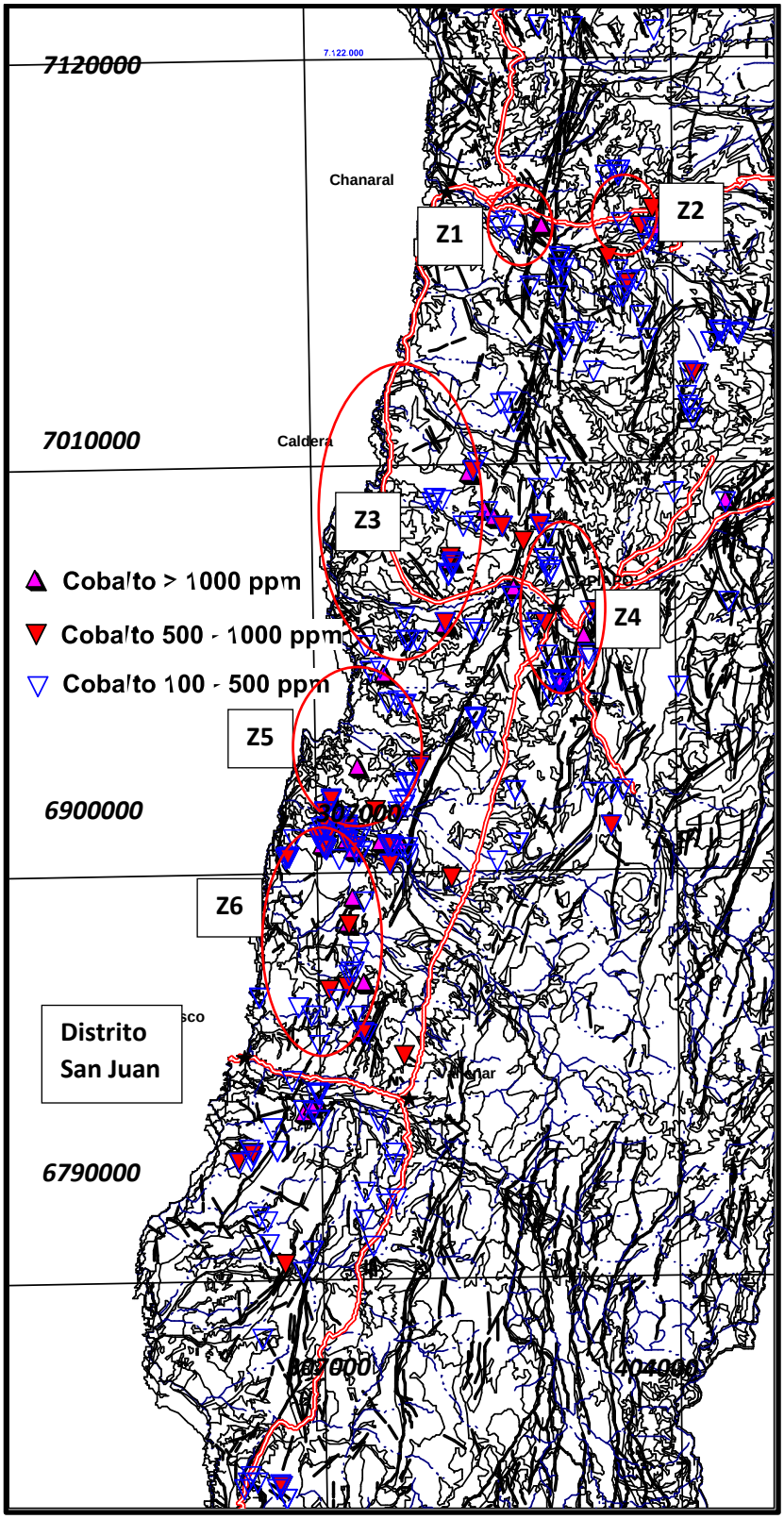


Figura 4.7. Contenidos de Cobalto de yacimientos en otras zonas (Z1 a Z6) de La Provincia Metalogénica de la Cordillera de la Costa y lineamientos principales.

4.2. Distritos por Manganeso.

La producción de Manganeso comenzó en Chile en el siglo XIX, como consecuencia de la demanda del mercado internacional para hacer frente al creciente empleo del ferromanganeso en el proceso de aceros Bessemer. Dentro de los primeros 10 años, la explotación de los yacimientos chilenos alcanzó la cifra de 52.000 ton. anuales que se exportaban a Inglaterra. Este ritmo se vio obligado a reducirse debido a la fluctuación del precio en el exterior. La Primera y Segunda Guerra Mundial generó un repunte de la producción chilena de manganeso, donde, la producción alcanzó la cifra récord de 114.000 ton en el año 1943, para caer verticalmente al terminar la Guerra en 1945.

Según el "Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 1997 – 2016", la producción de manganeso bajo desde 62.887 ton anuales en el año 1996 hasta 5.722 ton anuales en el año 2009. Según consta en los registros la producción de manganeso se detiene a partir del año 2009 (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Producción de Manganeso de la Minería Metálica Chilena (Fuente: Comisión Chilena del Cobre, Anuario de Estadísticas del Cobre y otros Minerales 1997 – 2016).

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
MANGANESO (TM de mineral)	62.887,0	63.673,0	48.931,0	40.505,0	41.716,0	31.320,0	12.195,0	19.641,0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
MANGANESO (TM de mineral)	24.801,0	39.786,0	37.169,0	26.808,0	18.273,0	5.722,0	-------	------

Dentro de los mayores productores de Manganeso en Chile se encontraba Manganesos Atacama, filial de Compañía Minera del Pacífico, que en los años 2004 y 2005 produjo 23.599 y 23.591 ton de manganeso respectivamente.

En términos generales, los recursos de manganeso en Chile se encuentran en la región de Coquimbo y parte sur de la región de Atacama, en el Altiplano de la 15ª región de Arica y Parinacota y en los yacimientos sedimentarios metamórficos precámbricos de las provincias de Valdivia y Cautín (Peebles y Ruiz, 1985; Ruiz y Peebles, 1988). Los de mayor importancia tienen una amplia distribución en la región de Coquimbo, en la denominada Cuenca del Manganeso del Cretácico Inferior. Los depósitos se ubican en rocas de la Formación Arqueros y en rocas de la Formación Quebrada Marquesa. Estos se habrían formado en tres ciclos diferentes. El más antiguo estaría representado por los depósitos reconocidos en el distrito Lambert, el intermedio por los yacimientos de los distritos Arqueros, Talcuna, Las Cañas (La Liga), El Arrayan, Corral Quemado y Fragua, y el último ciclo y más joven está representado por depósitos menores ubicados al suroeste del distrito Talcuna (Aguirre y Egert, 1965; Aguirre y Mehech, 1964; Aguirre, 1970). Los depósitos formados en el ciclo intermedio son los de mayor interés económico, en base a su

tamaño y continuidad de los mantos. En una reciente visita a los distritos de la región de Coquimbo, se pudo constatar que la totalidad de los depósitos de manganeso se encuentran paralizados y la mayoría de ellos, propiedad de CAP, se encontraban con sus accesos restringidos ya que se habían ejecutado los planes de cierre de faenas mineras. Sólo fue posible acceder a parte del distrito Corral Quemado, al distrito Fragua y a la parte sur del distrito Las Cañas. De igual modo se describen las características principales de los distritos de interés de esta área.

4.2.1. Distrito Lambert

Se ubica en el dominio D3 definido por Jorquera et al. (2011) en el área definida en el mapa de Yacimientos Metalíferos de La Serena - La Higuera (Fig. 4.8). Se encuentra a unos 20 km al noreste de la ciudad de la Serena y se accede por la quebrada Santa Gracia hasta el sector donde se ubica la planta de lixiviación San Lorenzo de Lambert, para luego continuar por quebrada Arrayán. El distrito se caracteriza por la presencia de depósitos vetiformes y estratiformes de Cu, Mn, Au y Ag.

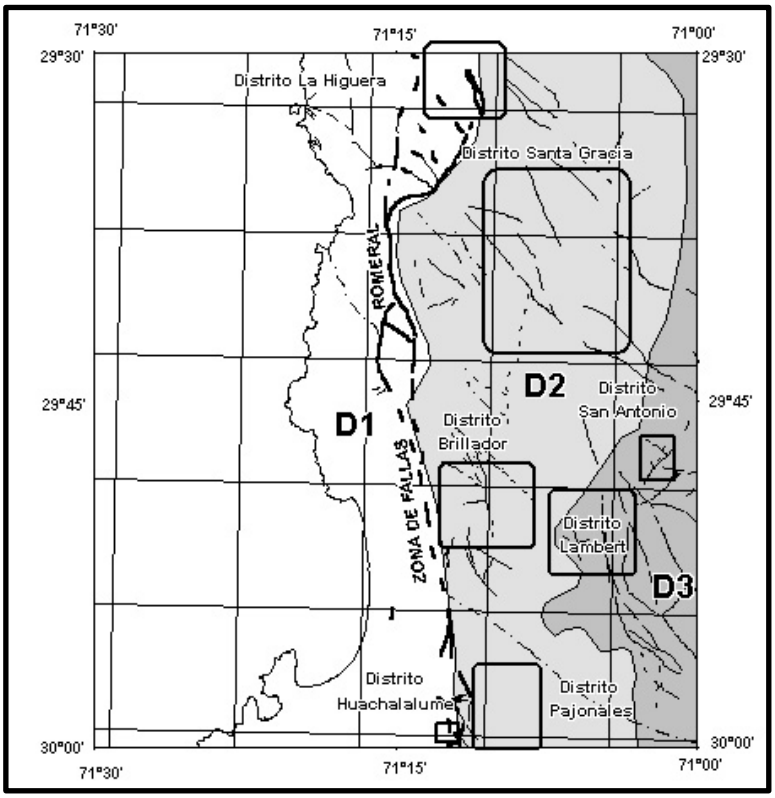


Figura 4.8. Contexto metalogénico principales distritos mineros en el área La Serena-La Higuera (tomado de Jorquera et al., 2011).

En el contexto de este dominio afloran rocas volcánicas y sedimentarias de rumbo NNW y suave manteo al este donde destaca la presencia de andesitas, andesitas basálticas, basaltos, areniscas calcáreas y calizas asignadas a la formación Arqueros (Kiv), de edad neocomiana. Estas rocas están en contacto por falla normal de bajo ángulo con brechas epiclásticas e intercalaciones de areniscas, tobas y andesitas asignadas a la formación Quebrada Marquesa (Kivs). El conjunto de

rocas antes descrita se encuentra intruida hacia el oeste por dioritas, dioritas porfídicas, microdioritas y andesitas de edad cretácica inferior (Kig). Granitoides monzoníticos a dioríticos de edad cretácica superior (Ksg) intruyen a las rocas de la formación Quebrada Marquesa (Kivs) unos 4 km al este del distrito (Fig. 4.9).

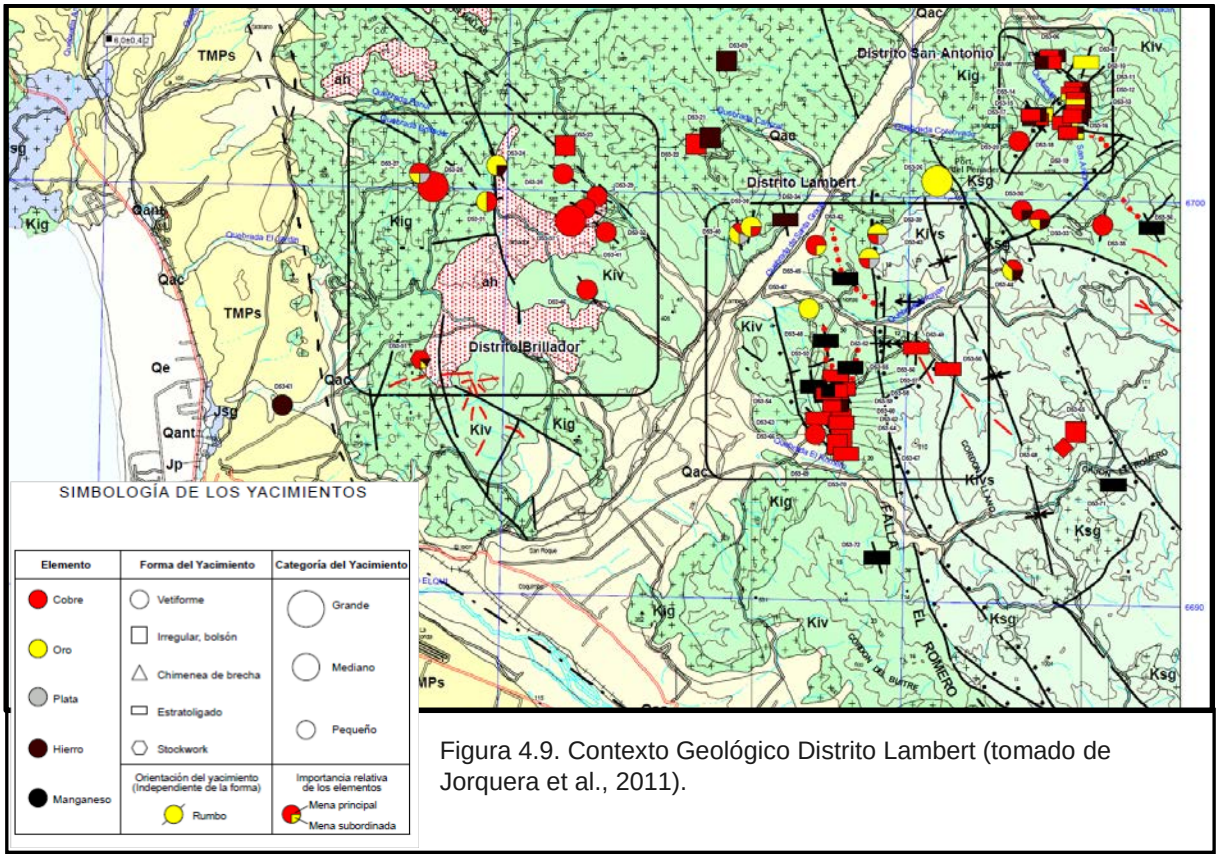


Figura 4.9. Contexto Geológico Distrito Lambert (tomado de Jorquera et al., 2011).

Los depósitos de manganeso son estratiformes y se emplazan con una actitud solidaria a los niveles de tobas, areniscas, limonitas y andesitas que los contienen, con una marcada tendencia NNW y manteos que varían entre 10º y 30º al este. Las corridas de estos depósitos tienen en promedio unos 300 m, con la excepción de mina Jamelas o Altoqui (D53-55), donde se observa una corrida de 3 km. La potencia de los mantos varía entre 0,6 y 4 m, con un promedio de 1 m, y se reconocen desarrollos a lo largo del manteo de aproximadamente100 m.

La mineralogía de mena de los depósitos de manganeso incluye pirolusita, braunita, psilomelano y cantidades subordinadas de minerales oxidados de Cu, en una ganga de calcita (Jorquera et al., 2011).

4.2.2. Distrito Arqueros.

Se ubica en el dominio D1C definido por Jorquera et al. (2012) (Fig. 4.10) en el área descrita en el mapa de Yacimientos Metalìferos de Condoriaco – Rivadavia. Se accede a él luego de recorrer unos 15 km hacia el norte desde el pueblo de Nueva Talcuna. En este distrito se concentran

depósitos estratiformes de Mn-Fe y Cu-Ag y depósitos vetiformes de Ag con cantidades subordinadas de Cu.

Las rocas que afloran en el Distrito corresponden a areniscas, brechas volcánicas, brechas epiclásticas, tobas, andesitas y filones andesíticos de la Formación Quebrada Marquesa (Kivs), y andesitas, basaltos, calizas y areniscas calcáreas, areniscas, conglomerados, tufitas y lutitas de la Formación Arqueros (Kiv). El conjunto de rocas antes descrito se encuentra cortado por pórfidos andesíticos, basálticos, dioríticos y dacíticos, asignados al Cretácico Superior (83-76 Ma). Se reconoce en la porción sur del distrito la expresión del pliegue anticlinal de Talcuna, rasgo característico que afecta a las rocas estratificadas del Cretácico Inferior (Jorquera et al., 2012) (Fig.4.11).

La mineralización de Mn-Fe está asociada a tobas y/o areniscas volcánicas rojas del miembro 1(b) de la formación Quebrada Marquesa (Kivs; Emparán y Pineda, 1999) o miembro 5 de la Formación Arqueros (Aguirre, 1970). Los mantos mineralizados consisten en horizontes de potencia centimétrica, ricos en minerales de Mn y Fe, intercalados con niveles de tobas y/o areniscas, que presentan cemento carbonatado ocasional. Estos cuerpos suelen tener dos a tres metros de potencia, y han sido explotados sólo a pequeña escala.

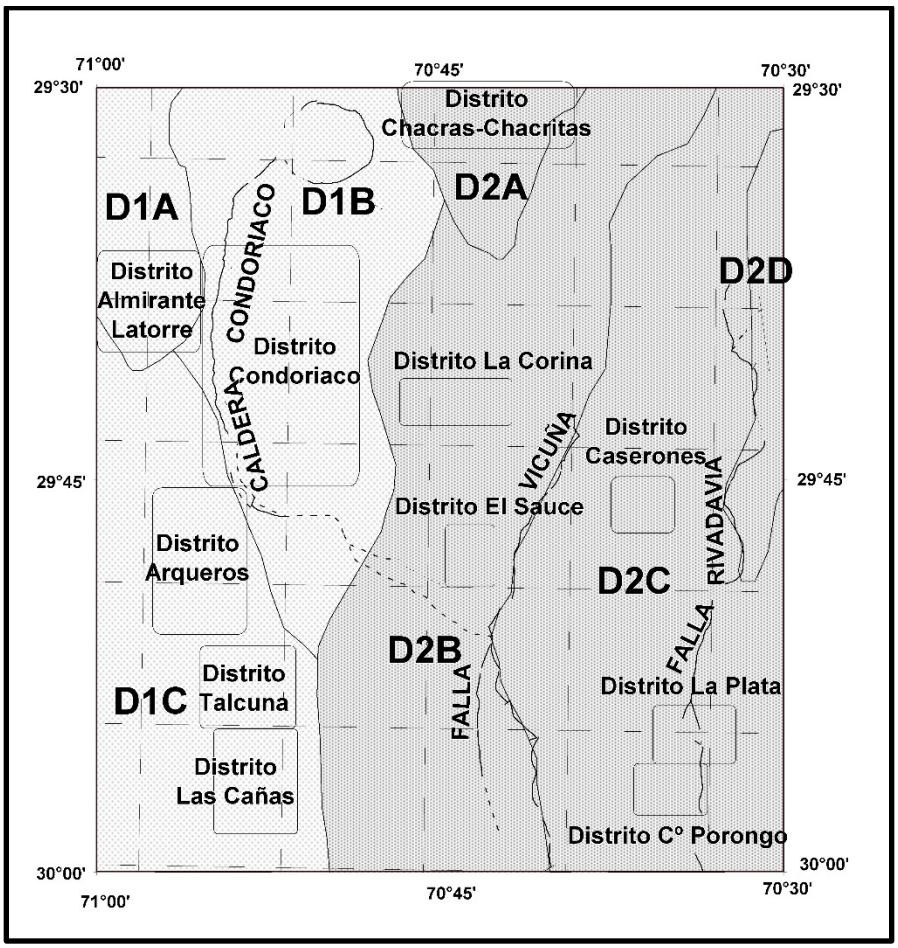


Figura 4.10. Dominios metalogénicos y ubicación de distritos mineros (tomado de Jorquera et al., 2012).

El resultado de análisis químicos de muestras de los mantos indica contenidos de hasta 20% de MnO, 278 ppm a 0,61% de Cu, 946 a 25096 ppm de Ba. Las concentraciones de Pb son menores a 426 ppm, salvo en la mina La Palmira (D54-17) donde se registra una concentración de 4710 ppm de Pb (Jorquera et al., 2012).

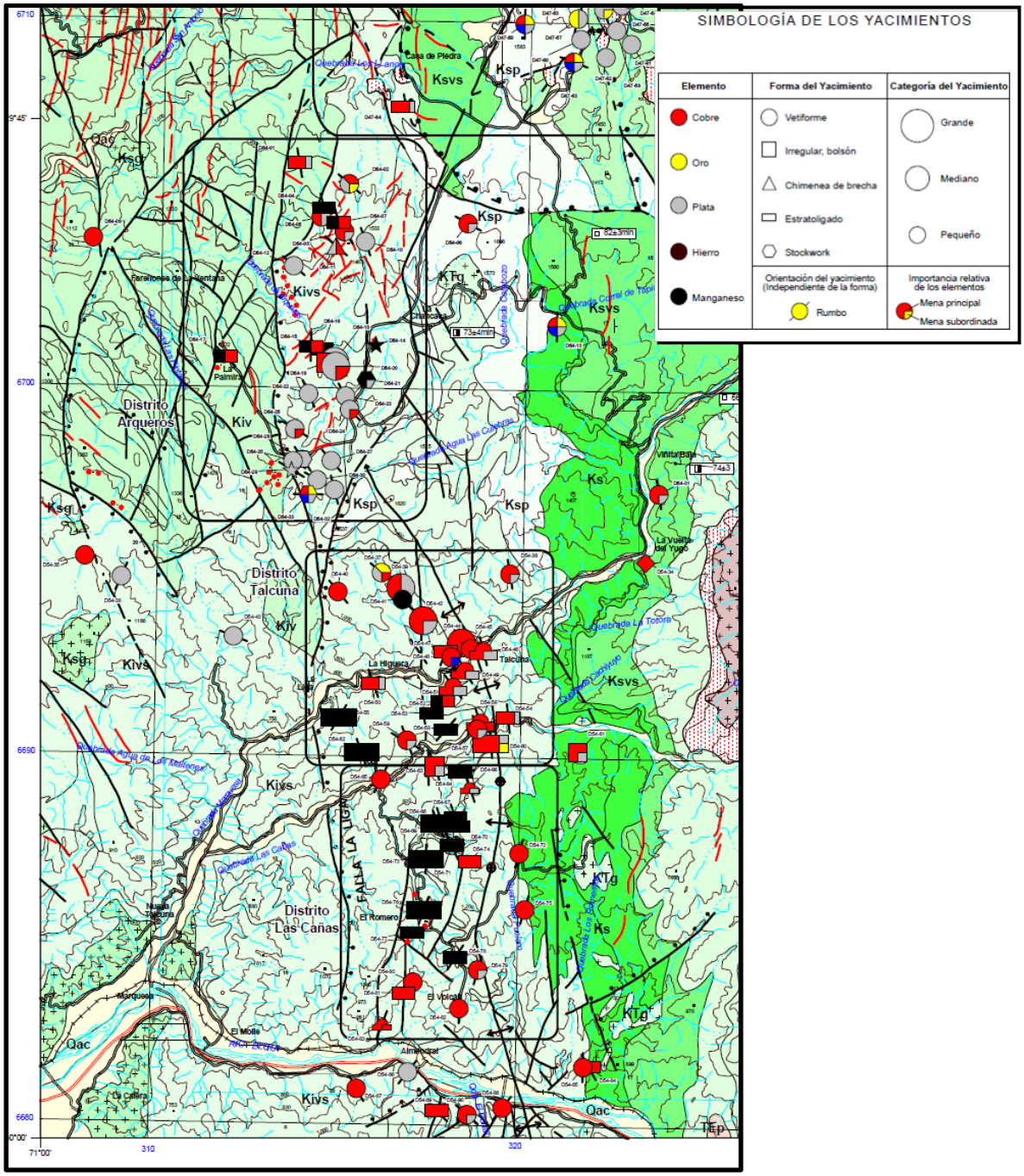


Figura 4.11. Contexto geológico distritos Arqueros, Talcuna, Las Cañas (tomado de Jorquera et al., 2012).

4.2.3. Distrito Talcuna

Se ubica en el dominio D1C definido por Jorquera et al. (2012) (Fig. 4.10) y se accede a él desde la intersección de Quebrada Marquesa con el río Elqui, luego de recorrer unos 12 km en dirección noreste. En el distrito se reconocen rocas de los miembros superior e inferior de la Formación Quebrada Marquesa (Kivs), las que incluyen brechas epiclásticas, areniscas, areniscas calcáreas, andesitas, e intercalaciones de tobas y la presencia de sills microdioríticos y andesíticos mineralizados. Esta secuencia es parte del anticlinal de Talcuna cuyo eje de plano axial se orienta según dirección NNW y se extiende por al menos 30 km en sentido SSE (Fig.4.11).

Los depósitos mantiformes de Mn se localizan preferentemente al oeste del distrito y están intercalados dentro de una secuencia de tobas, areniscas tobáceas y brechas sedimentarias. La corrida de estos depósitos es del orden de cientos de metros y su potencia varía entre 0,4 y 1,7 m. La mineralogía de mena consiste de cryptomelano, pirolusita, braunita, y presenta, de manera subordinada minerales oxidados de Cu y Ag. La ganga se compone de calcita y no se observan evidencias de alteración en la roca de caja.

El resultado de análisis químicos en muestras de mena de los mantos muestra contenidos de Mn superiores a 20% en minas La Liga de Talcuna (D54-55), mina Alta (D54-62) y Balcanes-La Higuera (D54-58). Las concentraciones de Cu alcanzan valores de hasta 0,56% en mina La Liga de Talcuna (D54-55), con un promedio de 0,23% en el distrito para este tipo de mantos. Las concentraciones de Ag alcanzan valores de hasta 33 ppm en mina Alta (D54-62) y 16 ppm en mina La Liga de Talcuna (D54-55).

4.2.4. Distrito Las Cañas

Se Ubica en la porción sur del dominio D1C definido por Jorquera et al., (2012) (Fig.4.10) y se accede a éste desde Quebrada Marquesa para luego tomar Quebrada Las Cañas, desviándose luego de recorrer unos 10 km desde la localidad de Marquesa. La actividad extractiva de Mn en el distrito se remonta a mediados del siglo XX, en minas El Romero (D54-76) y San Carlos (D54-73) (Biese, 1950; Biese, 1956).

Al igual que en el distrito Talcuna, en este distrito se reconocen rocas de los miembros superior e inferior de la Formación Quebrada Marquesa (Kivs), las que incluyen brechas epiclásticas, areniscas, areniscas calcáreas, andesitas, e intercalaciones de tobas y la presencia de sills microdioríticos y andesíticos mineralizados. Toda esta secuencia es parte del anticlinal de Talcuna y en general los depósitos de manganeso que se han explotado se localizan en el flanco occidental de esta estructura, al igual que en el distrito Talcuna (Fig. 12).

El distrito está constituido por depósitos estratiformes de Mn, Cu-Ag y Cu, y depósitos vetiformes de Cu con Ag subordinada.

Los depósitos estratiformes de Mn, concordantes con los niveles estratificados de la Formación Quebrada Marquesa (Kivs), presentan rumbos que varían entre 25ºW y 32ºE, y manteos inferiores a 25º al W. Tienen corridas de hasta 600 m y promedio de 300 m. La potencia de los mantos no

supera los 2,2 m y tienen en promedio alrededor de 0,7 m. Estos depósitos han sido explotados mediante galerías de longitudes inferiores a 50 m de longitud. Los mantos están intercalados en una secuencia de rocas que incluye areniscas, areniscas volcánicas, limolitas, calizas, brechas volcanoclásticas y tobas.

La mineralogía de mena de estos depósitos comprende pirolusita, psilomelano, y minerales oxidados de Cu, además de escasa presencia de magnetita, calcopirita, bornita y sulfosales de Ag. La ganga es principalmente calcita, y en menor cantidad se presenta baritina y yeso. Por lo general no hay evidencias de alteración de la roca de caja y ocasionalmente es posible observar arcillas, clorita y escasa sericita.

Análisis químicos en muestras de mena indican concentraciones de Mn superiores a 20%. Las concentraciones de Cu son menores a 846 ppm y el contenido de Ag alcanzan valores de hasta 43 ppm, siendo el promedio en el distrito, de 24 ppm (Jorquera et al., 2012).

4.2.5. Distrito Corral Quemado

Se ubica dentro del dominio metalogénico D1 definido por Jorquera et al. (2009) (Fig.4.12), a aproximadamente 20 km al norte de la localidad de Samo Alto. Los yacimientos del distrito consisten en mantos y lentes de manganeso intercalados en una secuencia de rocas que incluye areniscas, limolitas y tobas asignadas a la Formación Quebrada Marquesa (Kivs) (Fig.4.13). Según Peebles y Klohn (1970), la empresa inglesa Chilean Manganeso Co. inició la explotación de manganeso en Chile en el año 1884, en las minas del distrito Corral Quemado y otros de las regiones de Atacama y Coquimbo, hasta el año 1904. La actividad en el distrito se habría reiniciado el año 1937 (González, 1938), con una producción de 10.000 t de Mn con ley media de 46%, entre mayo y diciembre del año 1937, y similar cantidad en el primer semestre del año 1938. En 2009, los yacimientos del distrito eran explotados por Manganesos Atacama S.A., en las minas Loma Negra y Toda la Vida (D61-05). Loma Negra era explotada a rajo abierto, y poseía reservas probadas de 7 millones de toneladas con ley media de 12% de Mn. En Toda la Vida se señalaban reservas probadas de 250.000 t con ley media de 41% de Mn, y se desarrollaba mediante minería subterránea con una producción de 5.000 t/mes (www.manganeso.cl). En el distrito se han explotado menas con leyes entre 30% y 52% de Mn.

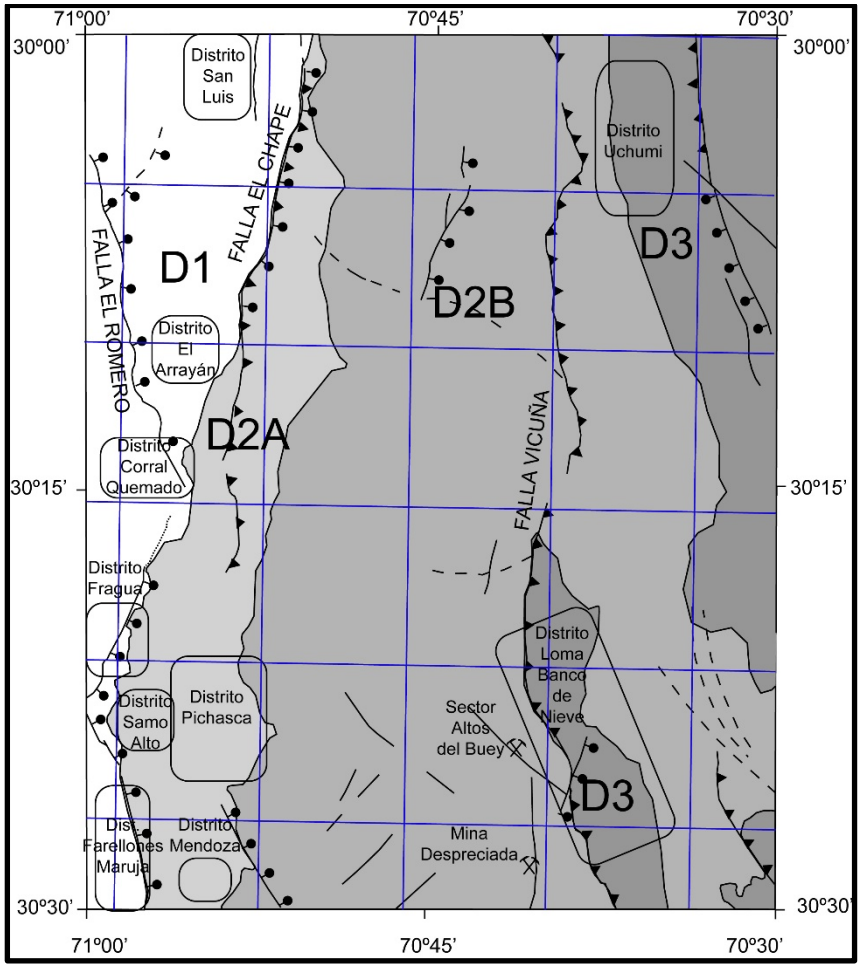


Figura 4.12. Contexto metalogénico distritos mineros (tomado de Jorquera et al., 2009).

El piso de la secuencia que contiene los mantos, lentes y bandas de manganeso corresponde a una brecha volcánica con clastos de lava andesítica amigdaloidal y, localmente, a areniscas volcánicas de grano grueso con abundante clorita, mientras que el techo de la secuencia está constituido por lutitas, areniscas y calizas fétidas de color amarillo, de ambiente lacustre. Según Ruiz y Peebles, (1988) en el sector occidental del distrito, la mineralización se asocia a depósitos estratiformes de travertino. Los mantos ricos en manganeso presentan corridas kilométricas, en general subhorizontales y con espesores entre 2 y 6 m. Se reconocen bandas de potencias decimétricas, de mayor ley. Las zonas de mayor potencia corresponden a sectores donde los mantos se encuentran plegados y repetidos (Ruiz y Peebles, 1988). Los minerales de mena de los depósitos corresponden a braunita, pirolusita y en menor medida manganita y psilomelano, (Aguirre y Mehech, 1964). La braunita ocurre mezclada con la ganga (principalmente piedmontita y calcita) y suele formar texturas bandeadas, con alternancia de braunita y ganga. La braunita también ocurre como pequeños parches asociados a pirolusita (Aguirre y Mehech, 1964). La pirolusita es el único mineral presente en la mina Loma Negra (D61-05) y puntualmente, este mineral forma agujas entremezcladas con la ganga, generando una textura levemente bandeada, donde alternan bandas mineralizadas y ganga. Ocasionalmente la pirolusita constituye agregados lamelares o está finamente diseminada en la ganga (Aguirre y Mehech, 1964).

El resultado del análisis químico de una muestra de mena presenta contenidos de MnO superior a 20%, 21,5% de CaO y menos de 1% de Fe2O3 (Jorquera et al., 2009).

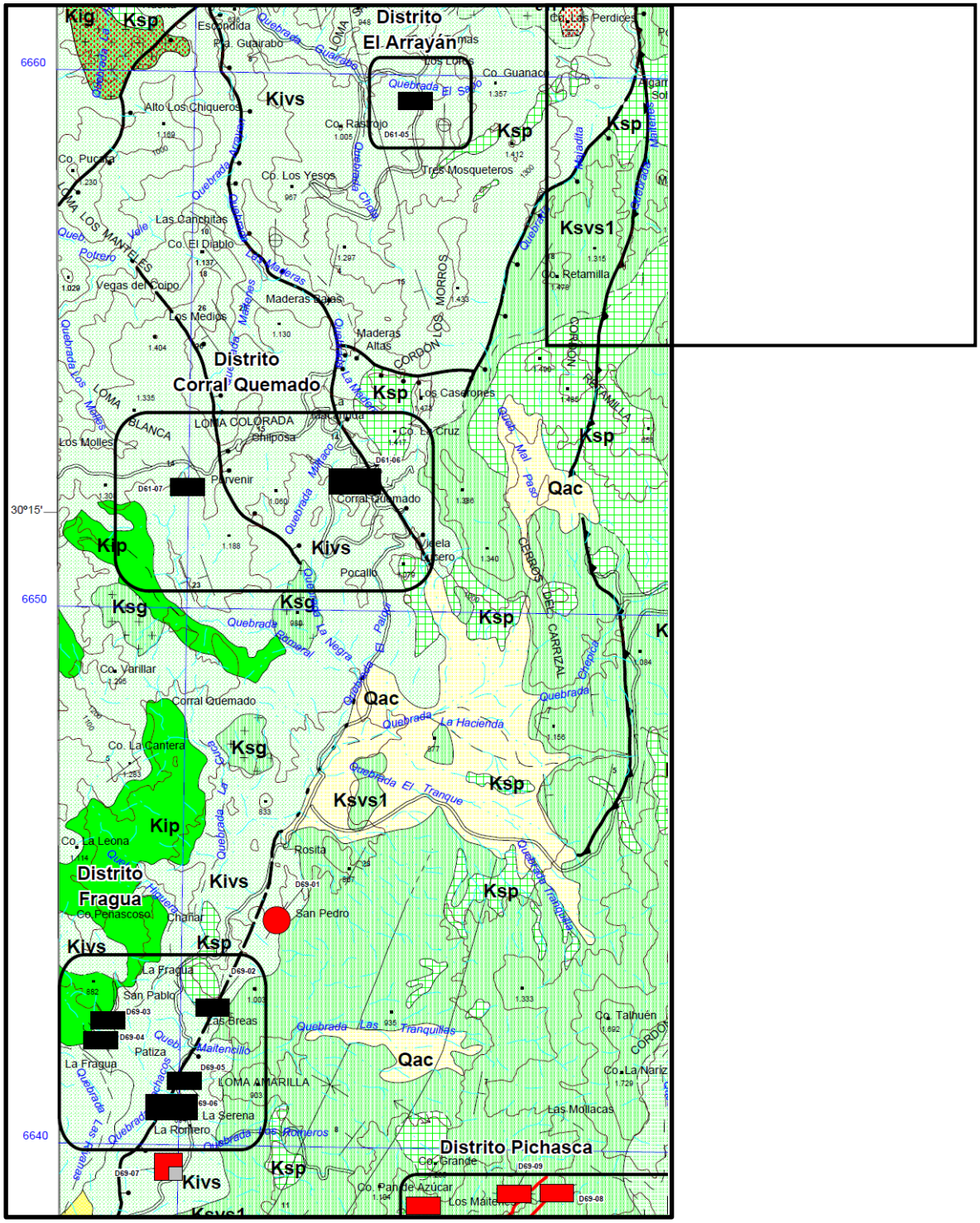


Figura 4.13. Contexto geológico distritos mineros (tomado de Jorquera et al., 2009).

4.2.6. Distrito minero El Arrayán

Se localiza a 8 km al norte del distrito Corral Quemado, a unos 30 km al norte de la localidad de Samo Alto. Los yacimientos de este distrito empezaron a explotarse en forma sistemática solo a partir del año 1907. En el año 1970 únicamente registraba actividad de mediana escala, la mina Santo Tomas II, mientras que otras minas menores del distrito registraban solo explotación artesanal (Peebles y Klohn, 1970). Las labores de explotación en el distrito se concentraron en los mantos de manganeso, en zonas donde ocurren bandas de manganeso o lentes con manganeso concordantes con la estratificación dentro de un nivel de areniscas volcánicas rojas (Peebles y Klohn, 1970). En algunos sectores del distrito se asocia a depósitos de travertino, dentro de una secuencia de areniscas y tobas de 2 a 10 m de espesor. Al igual que en Corral Quemado, la roca que subyace la secuencia que contiene los niveles con manganeso corresponde a lavas amigdaloidales, y el techo consiste de una secuencia sedimentaria lacustre, de color amarillo característico (Ruiz y Peebles, 1988). La secuencia volcanosedimentaria se dispone plegada y fallada, y conforma pliegues de eje NNO, con manteos NS con variaciones al este y oeste. Este conjunto de rocas ha sido asignado a la Formación Quebrada Marquesa (Kivs), y está cortado por cuerpos porfídicos de rumbo general NE (Ksp). Los mantos ricos en manganeso presentan rumbo general NE y manteos variables de 13º-15º E. La mineralogía de mena de los depósitos comprende principalmente braunita, pirolusita y en menor medida psilomelano y manganita (Peebles y Klohn, 1970). La pirolusita es producto de alteración de la braunita, y se presenta en cristales euhedrales con un clivaje claramente definido y que, en parte, presentan un arreglo radial. También es común la textura botroidal, coloforme. El psilomelano está presente, en la mayoría de los casos, con textura bandeada, coloforme (Aguirre y Mehech, 1964). La ganga es principalmente calcita y baritina.

Peebles y Klohn (1970) señalan para la mina Santo Tomás II, leyes medias que varían entre 42 y 48% de manganeso.

4.2.7. Distrito minero Fragua

Localizado a unos 8 km al NO de la localidad de Samo Alto. Las minas del distrito se encuentran actualmente paralizadas. Al igual que en el distrito Corral Quemado, se explotaron minerales de manganeso desde el año 1884 por la empresa inglesa Chilean Manganese Co. Estos eran transportados a lomo de mula y en carretas hasta la estación Recoleta del ferrocarril longitudinal (Peebles y Klohn, 1970). Dicha actividad cesó el año 1904, y se habría retomado a fines de la década de 1930. En la mina Las Breas (D69-02) se indica una producción de 288 t desde 1945 a marzo de 1946, con leyes sobre 48% de Mn (Villavicencio, 1946). Las labores mineras se desarrollaron en depósitos manganesíferos estratigráficamente equivalentes a los reconocidos en el distrito Corral Quemado, los que se intercalan con limolitas, niveles de chert, calizas, tobas, areniscas y andesitas pertenecientes a la Formación Quebrada Marquesa.

Los mantos manganesíferos presentan corridas de cientos de metros, potencias en el rango 0,5 a 1,5 m, y se disponen con rumbo NO y manteos variables que no superan los 25º. La mineralogía de mena de los depósitos consiste en braunita, manganita, pirolusita, hausmanita y psilomelano, predominando braunita y manganita (Aguirre y Mehech, 1964). Estos autores indican, además, que la braunita se observa a) entremezclada con manganita y pirolusita, b) en cristales formando

grupos compactos carentes de ganga, c) como pequeños cristales euhedrales diseminados en la ganga (secciones cuadrangulares y pentagonales), d) llenando poros como bandas concéntricas, alternando con calcita, e) ocupando espacios entre poros y f) como grandes cristales, en ocasiones con lados reemplazados por pirolusita y /o conteniendo inclusiones con forma de agujas de pirolusita levemente orientadas. La manganita ocurre como relleno de fracturas y, en parte, como cristales aciculares radiales que forman agregados; ocasionalmente se asocia a braunita, a la que parece reemplazar. Además, la manganita ocurre rodeando cristales de hausmanita o formando, junto a braunita, parte de bandas concéntricas o como fina diseminación en la ganga. La pirolusita es escasa y se encuentra entremezclada con braunita, como inclusiones en manganita y braunita y, en parte, como cristales aciculares, incluidos en braunita. En algunas muestras este reemplazo se realiza según dos direcciones preferenciales. La hausmanita y el psilomelano son escasos. La ganga es principalmente calcita, cuarzo y un mineral rojo no identificado de cristales muy finos (Aguirre y Mehech, 1964). En secciones pulidas pertenecientes a la mina Las Breas (D69-02), se han identificado nódulos de manganeso que rodean cristales de hematita. Algunos de estos nódulos presentan núcleos de hematita, tienen diámetros que varían en el rango 0,01 a 0,05 mm, y forman, en algunos sectores, 'cadenas' de nódulos. Un análisis químico realizado en una muestra de mena del distrito indica contenidos de manganeso no superior a 16,5%, un porcentaje de CaO de 51,91% y de SiO2 de 27,31%. La concentración de Cu es baja (menor a 0,03%), y Au y Ag están bajo los límites de detección.

4.2.8. Recursos Mineros por Manganeso

Los yacimientos del distrito Corral Quemado fueron explotados por Manganesos Atacama S.A., en las minas Loma Negra y Toda la Vida (D61-05) hasta el año 2009. Loma Negra se explotaba a rajo abierto, y poseía reservas probadas de 7 millones de toneladas con ley media de 12% de Mn. Toda la Vida tiene reservas probadas de 250.000 t con ley media de 41% de Mn, y producía, en forma subterránea, 5.000 t al mes (Jorquera et al., 2009). Esta compañía, filial de CMP, es propietaria de las pertenencias mineras de Corral Quemado, Fragua, El Arrayán, Romero, San Carlos, La Liga Alta, Lambert y Arqueros.

Fuera del ámbito de la región de Coquimbo se conoce la existencia de estudios en dos proyectos para la explotación de manganeso, ubicados en la XV Región de Arica y Parinacota, estos descritos en la sección 3.2 de este estudio. Estos se mencionan brevemente a continuación:

- Proyecto Minera Mar y Cielo, donde se ha determinado la existencia de 600 millones de toneladas (Mt), con una ley promedio de 47% de Mn (Camin Ingeniería y Explotación Minera, http://www.camin.cl/proyectos-mineros/proyecto-manganeso/).
- Proyecto Manganeso Los Pumas, ubicado en la comuna de Putre, en el cual, se han estimado 18,3 millones de toneladas indicadas con ley de corte 7,8% Mn, más 5,4 millones de toneladas de reserva inferidas. Proyecto de Minera Hemisferio Sur, se encuentra actualmente en espera de resoluciones. Se debe mencionar que el Consejo de Ministros revocó recientemente el permiso del proyecto, esto por temas ambientales.

Otros recursos de manganeso, de similares características se encuentran en la región de Atacama en el distrito Sierra de La Bandera del cual no se conoce reportes de recursos (Vivallo et al, 2008).

Adicionalmente se conocen depósitos de manganeso del tipo vetiformes y diseminados, al noreste de la ciudad de Copiapó, en la Sierra el Chulo y el sector del Portezuelo del Inca, los que han sido explotados a escala de pirquén (Díaz et al., 2006).

5. Metalurgia extractiva y recuperación de Cobalto y Manganeso

5.1. Mineralogía del Cobalto y metalurgia extractiva

La concentración de Cobalto en la corteza terrestre se estima en 22 ppm y ocurre generalmente diseminado en casi todos los minerales metálicos junto con cobre, níquel, plomo, zinc, hierro, plata y manganeso. También se encuentra en las aguas minerales y del mar.

Los minerales de Cobalto se agrupan en: arseniuros, sulfuros, sulfoarseniuros y óxidos. Los principales minerales con contenido de cobalto económicos se describen en la Tabla 5.1:

Tabla 5.1 Minerales comunes con contenido de cobalto que se encuentran en depósitos económicos.

Nombre	Grupo	Fórmula
Eritrina	Arsenato	$Co_3(AsO_4)_2 8H_2O$
Skutterudita	Arsenuro	$(Co,Ni)As_3$
Cobaltita	Sulfosal	CoAsS
Carrolita	Sulfuro	$Cu(Co,Ni)_2S_4$
Linnaeita	Sulfuro	$Co^{2+}Co_2^{3+}S_4$
Asbolita (Asbolana)	Óxido	$(Ni,Co)_{2-x}Mn^{4+}(O,OH)_4 nH_2O$
Pirita cobaltífera	Sulfuro	FeS_2 + Co

Tabla 5.2: Resumen de los principales tipos de depósitos de cobalto.

Tipo de Depósito	**Procesos genéticos de formación**	**Grado económico**	**Mayores ejemplos**
Hospedado en Sedimentos	Procesos diagenéticos en ambientes de o cercano a la línea de costa o lagos salinos donde los sulfatos de agua de mar se convierten en sulfuros y concentran elementos metálicos fuente de los sedimentos	0,1 – 0,4%	Tenke Fungurume, Democratic Republico f Congo; Mt Isa, Australia
Hidrotermal/volcánicos	Precipitación de minerales desde fluidos hidrotermales en roca de caja.	0,1%	Bou Azzer, Morruecos; Keretti, Finlandia
Sulfuros magmáticos	Fase líquida inmiscible de sulfuros es concentrada en los magmas. Esta fase colecta y concentra elementos metálicos ricos en cobalto	0,1%	Noril'sk, Rusia; Sudbury, Ontario, Canada; Kambalda, Asutralia
Lateritas	Climas tropicales, causan la meteorización de silicatos y sulfuros de cobalto en cuerpos ultramáficos, causando el enriquecimiento de cobalto en rocas residuales	0,05 – 0,15%	Koniambo Massif, New Caledonia
Nódulos de Manganeso y costras ricas en cobalto	Concreciones de óxidos ferromagnesianos en el piso oceánico	2,5%	Actualmente no económicos

La concentración económica de cobalto se puede encontrar en cuatro diferentes ambientes geológicos (Tabla 5.2), y por lo general se presenta en la mayoría de las veces asociada como sub-producto en la minería de otro metal base, preferentemente Níquel y Cobre. Grandes cantidades de cobalto ocurren en el piso oceánico, contenidos dentro de nódulos de manganeso y costras ricas en cobalto, aunque estos no son económicamente viables con la actual tecnología y condiciones económicas.

5.1.1. Procesamiento de minerales – metalurgia extractiva

Como se mencionó anteriormente el Cobalto que se obtiene a nivel mundial, casi en su totalidad proviene como un sub-producto, más o menos importante de las explotaciones de Cobre y Níquel.

Dependiendo de tamaño, grado de mineralización, morfología y proximidad a la superficie, los depósitos son explotados como minas subterráneas o a rajo abierto o combinación de ambas.

En general, los procesos de concentración de minerales ricos en cobalto se logran mediante molienda de la roca de mena y separación de los minerales con contenido de cobalto de los minerales de ganga usando procesos físicos y químicos.

La producción de cobalto en este caso, como sub-producto de otros metales, depende de los procesos extractivos del metal principal. Los procesos para la extracción de cobalto generalmente comienzan después de que el metal primario (usualmente níquel y cobre), han sido concentrados y extraídos. Los procesos son a menudo únicos a la mineralogía de la mena explotada. Existen tres procesos básicos usados en la extracción de cobalto: hidrometalurgia (incluyendo extracción por solvente; electrólisis y electrodeposición); pirometalúrgica y vapometalúrgica.

Las principales fuentes de minerales con cobalto son sulfuros. Dentro de estos los minerales de cobre y cobalto se procesan de manera convencional para producir un concentrado de cobre-cobalto. Esto se logra mediante flotación, para separar un concentrado rico en cobalto para tratamiento en el circuito posterior de refinación del cobalto. El proceso de separación por flotación utiliza agitación neumática y mecánica para producir burbujas de aire que transportan las partículas minerales a la superficie. Diferentes reactivos se utilizan para atraer los minerales de cobalto a las burbujas, en lugar de cobre. Los concentrados de cobalto, que pueden contener hasta un 15 por ciento de cobalto, se procesan posteriormente, utilizando procesos extractivos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos.

En los procesos hidrometalúrgicos, los metales son separados usando diferencias en la solubilidad, esto en base a las propiedades electroquímicas de la solución. Uno de los procesos hidrometalúrgicos más comunes es la lixiviación ácida a presión (PAL).

5.1.2. Extracción y refinado

El cobalto contenido en el concentrado de cobre se oxida junto con hierro durante la conversión final a cobre blister. De este proceso el cobalto entra en la capa de escoria, que puede ser tratada por separado, usualmente en un horno eléctrico. Este cobalto es recuperado por reducción con carbono en una aleación de cobre-hierro-cobalto. En la fundición de níquel, la mayor parte del

cobalto se recupera durante el refinado electrolítico del níquel por precipitación de la solución, usualmente como un hidróxido de cobalto. En la fundición de níquel, el cobalto comienza a oxidarse antes del níquel y puede recuperarse de la escoria del convertidor final. En la lixiviación por presión de amoníaco del níquel, el cobalto se recupera de la solución mediante reducción con hidrógeno bajo presión. En refinerías que usan una lixiviación de cloruro para la mata de níquel, la extracción con disolvente se utiliza para eliminar el cobalto directamente de la solución. La solución concentrada resultante, después de una purificación, es adecuada para la recuperación de cobalto mediante extracción electrolítica.

El proceso de electrodeposición, envuelve la filtración, calentamiento y una serie de estados electrolíticos de la solución rica en metales. La precipitación de cobalto ocurre sobre placas de acero inoxidable para formar cátodos de alta pureza. El ácido es reciclado.

Los procesos de vapor metalúrgicos son procesos modernos que son efectivos para el procesamiento de menas lateríticas, donde en el caso de lateritas niquelíferas el cobalto se recupera como un subproducto cuando presente.

En los procesos pirometalúrgicos, el calor es usado para separar los metales, esto basado en los diferentes puntos de fusión, densidades y otras características físicas y químicas de cada elemento. Estos métodos son usados principalmente en menas de sulfuros magmáticos y se basan en la fundición para recuperar el máximo posible desde los concentrados. El cobalto es usualmente extraído desde estos productos fundidos usando procesos electrolíticos donde el cobalto anódico está disuelto en la celda electrolítica y donde el cobalto iónico es depositado en el cátodo con algunas impurezas en la parte inferior de la celda.

Para los concentrados de minerales de cobre-cobalto, se realiza una tostación bajo condiciones controladas para transformar la mayor parte del sulfuro de cobalto en un sulfato soluble, minimizando al mismo tiempo el cambio de cobre y hierro en sus estados solubles en agua. El producto de este proceso es lixiviado, la solución resultante es tratada para eliminar el cobre y el hierro, y el cobalto es finalmente recuperado por electrólisis. Si los minerales de cobre y cobalto están en estado oxidado, el cobre puede ser eliminado por electrólisis en una solución de ácido sulfúrico y el cobalto precipitado del electrolito por ajuste de la acidez de la solución. El cobalto es eventualmente obtenido en el estado metálico por electrólisis.

Los concentrados de cobalto de los minerales de arseniuro se pueden tostar de la misma manera que los concentrados de sulfuro para eliminar el arsénico como trióxido de arsénico impuro. Alternativamente, se pueden lixiviar y cobalto precipitar con hidrógeno, similar a como se realiza con los concentrados de sulfuro de níquel.

5.2. Mineralogía del cobalto y metalurgia extractiva en Chile

La información presentada a continuación, es basada principalmente en los informes: Adaptación de Tecnología para la recuperación de Cobalto desde Minerales y Relaves (1988) y Proyecto Cobalto – Freirina (1983).

La ocurrencia de cobalto en Chile, como se mencionó en los capítulos anteriores, se encuentra principalmente incluida en la estructura de la pirrotina, arsenopirita, o constituyendo sulfoarseniuros y arseniuros, como cobaltita, esmaltina, skutterudita, safflorita y piritas cobaltíferas entre otros, o bien en forma de arsenatos, como es la eritrina. Con la excepción de la eritrina, normalmente estos minerales se asocian a calcopirita, pirita, blenda, galena y sulfuros de plata.

La obtención de cobalto metálico es compleja y existen varios procesos para aislarlo de las gangas y de los otros metales útiles como se ha visto anteriormente. Desde el punto de vista económico, el cobalto es un subproducto de la obtención de otros metales (ej. Cobre, Níquel).

5.2.1. Procesos de Concentración de Cobalto

Los principales procesos para la concentración de minerales de cobalto se refieren a concentración gravitacional, separación magnética y flotación.

Dentro de los procesos de concentración gravitacional se incluyen aquellos como separación en jiggs, mesas vibratorias, espirales y medios densos. La utilización de estos procesos de concentración gravitacional dependerá de las características que presente cada mineral, fundamentalmente: alto peso específico del mineral a concentrar, diferencia entre las densidades específicas de la especie mineral y la ganga (usualmente igual a 1 gr/cm^3 de diferencia o más), y grado de liberación mineral en molienda de la especie de interés, entre otras.

Las especies mineralógicas de cobalto como cobaltita, safflorita, skutterudita y esmaltina pueden separarse con facilidad desde una ganga compuesta de cuarzo o biotita (2,7 gr/cm^3), esto por métodos gravitatorios. La eritrina a su vez presenta un bajo peso, no apto para concentración gravitacional, pero sí es posible separarlo de una ganga de cuarzo en un concentrador magnético, dada la alta susceptibilidad magnética (53,2 x 10^6 cm^3/gr) que presenta esta especie.

En general, los arseniuros de cobalto tienen una alta densidad específica, comprendida entre 6,5 a 7,2, propiedad que los hace aptos para separarlos de la ganga contenida usando métodos gravitacionales como jiggs, espirales y mesas vibratorias.

La concentración por flotación para arseniuros y sulfo-arseniuros presenta dificultades, dado que estas menas contienen normalmente calcopirita y sulfuros de hierro coma pirita y pirrotina. La calcopirita puede ser fácilmente flotada, depresando el cobalto, en aquellos casos en que ambas especies se presentan claramente separadas. Pero la separación de las especies cobaltíferas de los minerales de hierro presenta dificultades, por cuanto ambas especies presentan similares comportamientos frente a la flotación, sobre todo en el caso de cobaltita.

5.2.1.1. Separación magnética

El separador magnético es un aparato que aprovecha la susceptibilidad magnética elevada que poseen algunos minerales, para ser separados de otros que no poseen esta cualidad. Minerales como pirita con contenido de cobalto [(Fe,Co)S_2], puede llegar a contener hasta un 22% de cobalto. Este mineral es una especie de hierro no magnético, por lo que es posible entonces

separarlo de otras especies de hierro que sí presentan esta cualidad en un mayor o menor grado, como lo son la pirrotina, magnetita y la hematita. Estos minerales cobaltíferos suelen estar asociados con otras especies de cobre como calcopirita, calcosina y bornita, en diferentes proporciones. El someter estos materiales al proceso de separación magnético, permite obtener un producto útil con un menor peso y mayor ley, respecto de la cabeza original. Otro caso donde se puede ocupar esta metodología es en la presencia de eritrina u otra especie oxidada de cobalto que pueden estar presentes en una gran proporción debido a la alteración de la mena primaria.

5.2.1.2. Concentrado por flotación

En el procesamiento de rocas de mena con minerales sulfurados de cobre y sub producto cobalto, la concentración por flotación se efectúa normalmente de la siguiente manera:
- Flotación global de cobre-cobalto, a partir de un pre concentrado obtenido por la vía gravitacional.
- Flotación selectiva del cobre, depresando el cobalto, a partir del concentrado global obtenido en lo flotación global previa.

En yacimientos de tipo polimetálicos se debe determinar la potencialidad del yacimiento con los diferentes metales (Cu, Ni y Co) y la relación entre estos que se obtendrá en el concentrado, esto para determinar el mejor proceso de recuperación de Cobalto.

5.2.2. Procesos de obtención de Cobalto

5.2.2.1. Proceso Piro Metalúrgico

En este proceso el concentrado obtenido de las plantas de flotación es tostado parcialmente, mezclado con Coke y Caliza y fundido en hornos eléctricos. En este procedimiento se obtiene una mata de cobre – cobalto o níquel – cobalto. La mata se trata posteriormente en convertidores obteniéndose cobre metálico y una escoria rica en cobalto. La escoria que contiene cobalto, cobre y hierro se funde con Coke para obtener una aleación de estos metales que se separan posteriormente por procesos químicos.

Dentro de los procesos químicos se destacan: Tuesta con Cloruro de Sodio, Electro-depositación, Hidrometalurgia a Presión, Extracción por Solventes.

5.2.2.2. Tuesta con Cloruro de Sodio

El concentrado se somete a una tuesta con cloruro de sodio seguida de una lixiviación de los cloruros producidos. Se purifica la solución precipitando algo de arsénico y hierro por intermedio de creta. El cobalto se precipita con hipoclorito de Ca. Con este reactivo se precipita primero el cobalto y después el níquel, procedimiento en el cual se puede tener primero un óxido de cobalto y después un óxido de níquel. Posteriormente se puede reducir los óxidos fundiendo con carbón. Por este sistema se puede obtener cobalto relativamente puro (98%).

5.2.2.3. Electro-depositación

El concentrado se lixivia con ácido sulfúrico y el cobre y el cobalto se obtienen como cátodos de cobre y cátodos de cobalto impuros, esto por medio de complejos sistemas de lixiviaciones y electro-depositaciones sucesivas para el cobre y el cobalto. Los cátodos se purifican fundiendo con fundente apropiados.

5.2.2.4. Hidrometalurgia a Presión

La materia prima usada puede ser mineral, concentrado, mata o algún sub producto de otros procesos. El reactivo usado en la lixiviación puede ser amonio o ácido y el elemento oxidante aire u oxígeno. Para materiales con alto contenido de cobalto es preferible el uso de ácido lixiviante, mientras que para materiales con alto contenido de níquel o cobre y bajo contenido de cobalto es preferible el amonio.

Una vez realizada la lixiviación se separa el sólido de la solución y esta última es sometida a purificación. Las impurezas más comunes son producto de reacciones secundarias y exceso de reactivo. El primer elemento que se precipita es el cobre, posteriormente el Ni, cuando está presente, y finalmente el Co.

El cobre suele precipitarse con hidrógeno obteniéndose cobre con fierro o cobalto, o en su defecto se obtiene una mezcla cobre – fierro y cobalto. En otros casos el hidrógeno puede cambiarse por hidrógeno sulfurado.

El níquel puede precipitarse con hidrógeno, como sulfato amoniacal de níquel y por electrólisis.

El cobalto a su vez puede precipitarse con hidrógeno, como cobalto metálico, o cristalizarse como sulfato amoniacal de cobalto.

La diversidad de alternativas de precipitación dependerá de la relación en que se encuentren los elementos Cu, Ni y Co en la solución.

5.2.2.5. Extracción por solventes

Existen estudios al respecto, siendo en materiales de los nódulos marinos donde más se ha experimentado con este proceso. Parece a primera vista como lo más promisorio en términos de un proceso de extracción de minerales complejos de Cu, Ni y Co, sin embargo, las publicaciones no han sido hasta ahora muy específicas el respecto.

5.3. Mineralogía del Manganeso y metalurgia extractiva

5.3.1. Mineralogía

El Manganeso es el 12avo elemento más abundante en la corteza terrestre, con un promedio de concentración de 0,1%. Es el 4to metal más abundante en uso comercial. En la naturaleza el manganeso se encuentra en forma de óxidos, carbonatos y silicatos. Los depósitos son generalmente de origen sedimentario con capas de óxidos ricos en hierro inter-estratificadas. El más común de los minerales de manganeso es pirolusita (MnO_2), pero también se encuentra como rodocrosita ($MnCO_3$), rodonita ($MnSiO_3$), braunita ($3Mn_2O_3MnSiO_3$), manganita negra ($MnO(OH)$) y

alabandita (MnS). Se consideraba que sólo los minerales que contienen más de un 35 por ciento de manganeso son comercialmente explotables, pero la falta de minerales de manganeso de alta ley ha tenido una influencia en el desarrollo y la utilización de minerales de manganeso de menor grado. Según el programa Federal Stockpile (EEUU), para minerales de manganeso o concentrados se requiere de un material procesado con un contenido bastante alto de manganeso y con cantidades mínimas de impurezas. Las impurezas incluyen óxidos de otros metales, tales como hierro, que se reducen junto con el manganeso al fundirse; elementos no metálicos tales como fósforo, azufre y arsénico; y "óxidos de ganga" metálicos tales como sílice, alúmina, cal y magnesia, que, con excepción de la sílice, permanecen generalmente en la escoria tras la fundición.

Otra potencial fuente de manganeso son los nódulos de manganeso o concreciones de hierro-manganeso que han sido encontrados sobre el fondo oceánico. Usualmente contienen un 30 – 36% de Mn. Los nódulos se encuentran en ambos océanos (Atlántico y Pacífico), estando principalmente en el Océano Pacífico. Estos nódulos son de interés ya que tienen concentraciones importantes de Níquel, Cobre y Cobalto como también grandes cantidades de manganeso, lo que los convierte en posibles fuentes de metales a futuro.

La mayoría de la producción de manganeso a nivel mundial se concentra en cuatro países: Australia, China, Gabón y Sudáfrica. El 90% de las reservas mundiales de manganeso se encuentran en estos cuatro países, junto con Brasil y Ucrania. Casi el 70% de las reservas mundiales de manganeso están contenidas en el distrito de Kalahari de Sudáfrica (Palisade Research, 2017).

5.3.2. Minería y concentración

A continuación, se describen algunos de los procesos utilizados a nivel mundial para la extracción y posterior refinación de minerales de manganeso.

5.3.2.1. Extracción de minerales de manganeso

La extracción de minerales de manganeso se realiza normalmente en rajos abiertos. Después de la extracción del material el proceso continúa con una concentración mecánica de manganeso y eliminación de impurezas metálicas, no metálicas, volátiles, etc. Para extraer las impurezas los minerales son lavados y posteriormente son removidas desde la cinta transportadora que lleva el mineral a las plantas de procesamiento. Algunas de las impurezas metálicas son: Fe, Pb, Cu, Zn, Ag, impurezas no metálicas: Azufre, Fósforo, impurezas volátiles: H_2O, CO_2, materia orgánica, ganga SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO, BaO. El material de manganeso se divide según tamaño, pasando el material grueso a planta y posteriormente a trituradoras primarias y secundarias y el material fino puede aglomerarse mediante sinterización (Fig. 5.1).

5.3.2.2. Concentración de minerales de manganeso por gravedad

La concentración de minerales de manganeso por gravedad puede realizarse con Jigs, mesas vibratorias, espiral Humphreys, espiral Reichert, mesa desimétrica Birtley entre otros.

El proceso de concentración Jigs consiste en que a través de estos se impulsa aire y se elimina la ganga en una corriente ascendente, mientras que los minerales más pesados (Mn), se asientan en el fondo y se concentran.

5.3.2.3. Concentración de minerales de manganeso por separación magnética.

Se basa en la separación de minerales de hierro de los minerales de manganeso basándose en las propiedades magnéticas de los primeros. Con esto se mejora la calidad del concentrado.

Figura 5.1: Ejemplo de extracción de mineral de manganeso (Fuente Maxtech Ventures en Palisade Research, 2017)

5.3.2.4. Concentración de mineral de manganeso por flotación

Uno de los procesos utilizados para la concentración de manganeso en la fracción de limo producida en los procesos de molienda y separación es la flotación. El tratamiento por flotación consiste en espesar los minerales de manganeso en un espesador de bandeja de rastrillo espiral.

El circuito de flotación se puede diseñar para tratar tres clases de minerales de manganeso.

1.- Minerales con una ganga de calcita alta.

2.- Minerales con calcita mixta y ganga silícea.

3.- Minerales con una ganga altamente silícea.

Los minerales de los tipos 1 y 2 requieren un tratamiento previo para eliminar la calcita en forma de espuma. La calcita debe eliminarse antes que el manganeso, ya que, si se deja en el circuito, flotará con el manganeso, dando así un concentrado de manganeso de baja ley. Para realizar este

proceso es necesario el consumo de gran cantidad de reactivos y los que varían con cada tipo y grado de mineral.

Dentro de los reactivos a utilizar se pueden mencionar los siguientes, para los casos de menas con minerales de ganga de calcita y menas con minerales de ganga silíceos y aluminios.

(1) Ganga de minerales carbonatados: la ganga de carbonato, como la calcita, se flota primero con ácido graso, utilizando una pulpa alcalina y un almidón o dextrina amarilla para inhibir el óxido de manganeso. La pulpa se acidifica y el óxido de manganeso flota con una emulsión de aceite.

(2) Ganga de minerales silíceos y aluminio: se flotan directamente en un circuito de ácido sulfúrico, usando la emulsión de aceite combustible anterior.

5.3.3. Extracción y refinado

El manganeso puro es producido por procesos hidrometalúrgicos y electrolíticos, mientras que el ferromanganeso y el silicomanganeso son producidos por la fundición de minerales en un alto horno o, más comúnmente, en un horno eléctrico. Los óxidos superiores (MnO_2, Mn_2O_3 y Mn_3O_4) pueden ser reducidos a óxido manganoso (MnO) por monóxido de carbono, pero este óxido inferior puede reducirse al metal sólo a temperaturas elevadas por carbono. La fundición se complica aún más por la acción de los óxidos de ganga. Por ejemplo, la sílice, un compuesto ácido, puede combinarse con MnO y evitar que se reduzca, un problema que puede corregirse mediante el uso de minerales altos en componentes básicos tales como cal y magnesia o mediante la adición de flujos básicos tales como tostado de caliza. Sin embargo, esto genera más escoria, que tiende a disolver el manganeso y a disminuir la cantidad de metal recuperado en la masa fundida. Además, dependiendo de la temperatura de fusión y la acidez o basicidad de la escoria, la sílice puede reducirse a silicio y entrar en el metal fundido.

5.3.3.1. Procesos de lixiviado

Los procesos típicos de lixiviacíon empleados son pasos químicos reductivos, incluyendo bio-lixiviación y electro-lixiviación. La purificación, separación y recuperación final se realiza mediante procedimientos tales como extracción por solvente, electrolisis y electrodeposición.

5.3.3.2. Proceso electrolítico

La electrodeposición de manganeso es un proceso importante para la producción de manganeso electrolítico de alta pureza (Zhang, 2007). Para aplicaciones en las que se prefiere el manganeso puro, se someten a tostación los minerales de manganeso para obtener una calcina, MnO, y ésta se disuelve en ácido sulfúrico para formar una solución de sulfato manganoso (Figura 5.2). El hierro (III) se elimina típicamente por precipitación con hidróxido a pH 3-4 y otras impurezas tales como Ni, Co, Cu, Zn se eliminan mediante precipitación con sulfuro. La solución de $MnSO_4$ resultante se puede usar para la producción de manganeso electrolítico. La solución purificada alimenta a una celda electrolítica y, con el paso de corriente eléctrica, el manganeso se deposita en capas de unos pocos milímetros de grosor sobre una lámina de cátodo de acero inoxidable con una pureza de 99,5% de Manganeso. Los cátodos se extraen periódicamente, y los depósitos de

manganeso se eliminan por martilleo. Las escamas se calientan a 500 °C, para remover el gas de hidrógeno, y producen metal de Manganeso con un 99,9% de pureza.

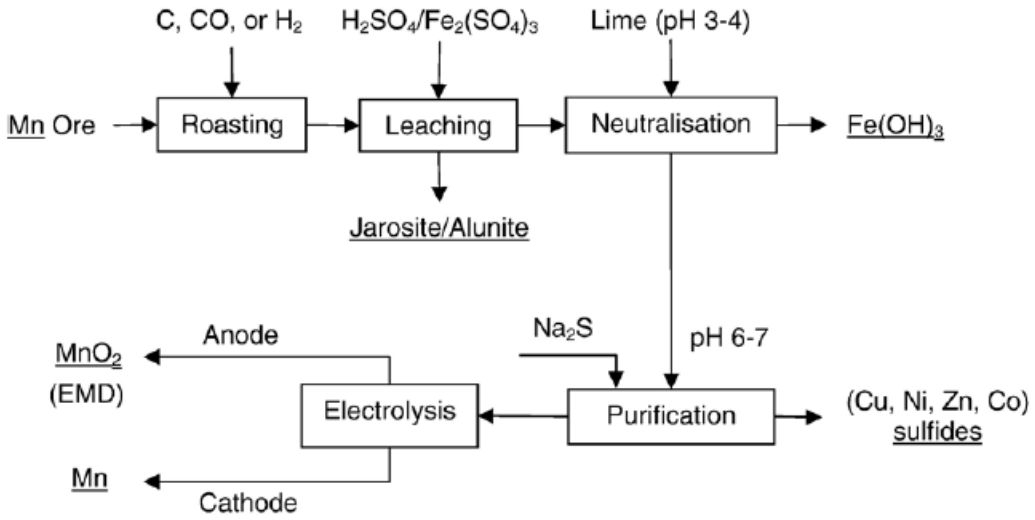


Figura 5.2: Proceso convencional de producción de Mn electrolítico y dióxido de manganeso electrolítico (Zhang, 2007).

5.3.3.3. Problemas de producción

Si bien el mineral de manganeso no es un recurso no metálico, la aplicación de la flotación para su beneficio es similar a la utilizada para los minerales no metálicos. Los reactivos no metálicos se utilizan para flotar minerales no metálicos, impurezas como la calcita, y otros reactivos no metálicos se pueden utilizar para concentrar el mineral de manganeso y rechazar los minerales de sílice y alúmina como una cola.

5.4. Mineralogía del manganeso y metalurgia extractiva en Chile

En Chile, la producción de manganeso ceso en el año 2009 (Fuente: Comisión Chilena del Cobre, Anuario de Estadísticas del Cobre y otros Minerales 1996 – 2015). Esta producción estaba asociada a la Empresa Manganeso Atacama que exportaba el 50% de la producción al mercado argentino y fabricaba ferroaleaciones de manganeso de alto y medio carbono. El cierre de la producción fue debido a la nula demanda de los productos de dicha empresa en el mercado (según informó mediante hecho esencial enviado a la SVS, el gerente general de la Compañía Minera del Pacífico, Erick Weber en esa oportunidad). La minera mantiene las pertenencias mineras Corral Quemado, Fragua, El Arrayán, Romero, San Carlos, La Liga Alta, Lambert y Arqueros, todas ubicadas en la IV Región de Chile.

La explotación de minerales de manganeso fue inicialmente concebida para explotar y exportar masivamente minerales de manganeso de alta ley. Estos minerales eran muy apreciados por la industria siderúrgica mundial en el siglo pasado. Actualmente estos minerales se encuentran agotados o son escasos y difíciles de explotar. La forma de extracción del mineral era a través de minería principalmente subterránea y en pocos yacimientos se ha utilizado extracción a rajo abierto.

De los capítulos anteriores se desprende que los principales minerales de manganeso que ocurren en los yacimientos chilenos son Braunita ($3Mn_2O_3MnSiO_3$, 50 – 60% de Mn), Pirolusita (MnO_2, 63,2% de Mn) y en menor medida Manganita ($Mn_2O_3H_2O$, 62,4% de Mn), Psilomelano ($BaMn_9O_{18}2H_2O$, 40 – 60% de Mn, varía el contenido de Ba, K y Na con las impurezas) y Hausmanita ($MnMn_2O$, 72% de Mn), asociados a minerales de ganga como Calcita ($CaCO_3$), Piedmontita ($2Ca(Al, Fe, Mn_3)(OH)Si_3O_{12}$) y Baritina ($BaSO_4$) entre otros.

La explotación, en el último período, de yacimientos de media ley de manganeso era principalmente para satisfacer la demanda de procesos de ferroaleaciones de manganeso, como ferromanganeso de alto carbono, producidos por la empresa Minera Manganeso Atacama.

Referencias

Aguirre, L.; Egert, E. 1965. Cuadrángulo Marquesa. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 15, 92 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.

Aguirre, L., Mehech, S., 1964. Stratigraphy and mineralogy of the manganese sedimentary deposits of Coquimbo province, Chile. Apartado. Economic Geology, Vol. 59, p. 428-442. Lancaster, Pa., E.E.U.U.

Aguirre, L. 1970. Cuadrángulo Lambert. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 23, 14 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago

Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., and Palma, G., 2017. Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. Ore Geology Reviews, 81, 62-78.

Biese, W., 1950. Informe sobre el yacimiento de manganeso "El Romero". (Inédito). Caja de Crédito Minero, 41 p. 1 mapa escala 1:10.000 (*).

British geological survey .2009. Cobalt. Mineral UK. Centre for sustainable mineral development.

Emparán, C.; Pineda, G. 2000. Area La Serena-La Higuera. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos, No 18, 1 mapa escala 1:100.000, Santiago.

Caraballo, M., Townley, B., González, E., Riquelme, B., 2017. Elementos de interés económico en relaves Chilenos: Estado del Arte. Informe Corfo, P1, Programas Tecnológicos, Valorización de Relaves. 175 pp.

Cruzat, A. 1968. Monografía sobre los yacimientos de cobalto chilenos (Inédito). Corporación de Fomento de la Producción-Instituto de Investigaciones Geológicas- Naciones Unidas, 30 p.

D'Aubarede, G. 1969. Evaluación de los conocimientos existentes sobre Cobalto, Manganeso, Mercurio. PNUD/CORFO/IIRN. Santiago.

Díaz, A.; Lacassie, J.P.; Vivallo, W. 2010. Yacimientos Metalíferos del área Andacollo- Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos, N° 31, 28 p., 1 mapa escala 1:100.000.

Díaz, A.; Lledó, H.; Vivallo, W. 2006. Yacimientos metalíferos de la Carta Copiapó. Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Serie Recursos Minerales y Energéticos No.26, 30 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Díaz, A.; Lledó, H.; Vivallo, W., 1998. Yacimientos metalíferos de la Hoja Los Loros, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapa de Recursos Minerales de Chile 2: 24 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Díaz, F.; Bembow, M.; Bravo, N.; Gutiérrez, A.; Montti, S.; Salinas, M.; Vogel, S. 1981. Mapa metalogénico pronóstico de la III Región (Inédito), Corporación de Fomento de la Producción-Instituto de Investigaciones Geológicas, 5 Vols., 6 mapas escala 1:250.000 (*).

Gelcich, S; Espinoza, C.; Vivallo, W., 1998. Yacimientos metalíferos de las hojas Chañaral y Diego de Almagro, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapa de Recursos Minerales de Chile 3: 17 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

González, J. 1938. Mineral Corral Quemado. (Inédito), Caja de Crédito Minero, 2 p. (*)

Hornkohl, H. 1942. El Cobalto en Chile. Anales 1er Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología, T. 4, p. 1602-1625, 3 microfotografías.

INTEC-CHILE. 1988. Adaptación de tecnología para la recuperación de cobalto desde minerales y relaves. Corporación de Fomento (CORFO), 204 p. Santiago.

Jorquera, R.; Díaz, A.; Vivallo, W.; Astudillo, N. 2009. Yacimientos Metalíferos del área Vicuña-Pichasca, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos, N° 29, 29 p., 1 mapa escala 1: 100.000.

Jorquera, R.; Pizarro, N.; Vogel, S. Díaz, A.; Vivallo, W. 2011.Yacimientos Metalíferos del área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos, N° 32, 32 p., 1mapa escala 1: 100.000.

Jorquera, R.; Díaz, A.; Vivallo, W.; Carrasco, R.; Pizarro, N.; Pineda, G.; Vogel, S. 2012 Yacimientos Metalíferos del área Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos, N° 33, 41 p., 1mapa escala 1: 100.000.

Lacassie, J.P.; Vivallo, W.; Díaz, A. 2016. Caracterización geoquímica de yacimientos metalíferos de la Región de Atacama mediante el uso de redes neuronales artificiales. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-16-61: 177 p, 1 CD. Santiago.

Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., Camus, F. 2007, Metallic ore deposits (Chapter 6). In: The Geology of Chile, T. Moreno, W. Gibbons (eds.), England, p. 181-201.

Manganesos Atacama S.A. 2009. Empresa del Grupo CAP (www.manganeso.cl)(22-01-2009).

Mathur, R., Marschik, R., Ruiz, J., Munizaga, F., Leveille, R., Martin, W., 2002. Age of Mineralization of the Candelaria Fe Oxide Cu-Au Deposit and the Origin of the Chilean Iron Belt, Based on Re-Os Isotopes. Economic Geology, 97 (1). DOI: 10.2113

Michaud, L. D. 2016. Manganese Ore Processing. (www.911metallurgist.com/blog/manganese-ore-processing) (24-10-2017).

Palisade Research. 2017. Manganese – the third electric vehicle metal no one is talking about.(www.mining.com/web/manganese-the-third-electric-vehicle-metal-no-one-is-talking-about-it-heres-how-to-take-advantage/) (24-10-2017).

Peebles, F.; Klohn, E. 1970. Geología de los Yacimientos de Manganeso de Corral Quemado, Arrayán y Fragua, Provincia de Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín 27: 58 p.

Peebles, F.; Ruiz, C. 1985. Distribución y Génesis de los Yacimientos estratiformes de manganeso en Chile. Actas 4° Congreso Geológico Chileno, Vol. 3, p. 3-271 - 3-287. Antofagasta, Chile.

Pizarro, N.; Portigliati, C.; Vivallo, W. Díaz, A. 2003. Yacimientos metalíferos de la Carta Caldera, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos 22: 23 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Ruiz, C.; Peebles, F. 1988. Geología y Yacimientos Metalíferos de Chile. Editorial Universitaria, 334 p.

Geoexploraciones. 1983. Proyecto Cobalto-Freirina, publicado en: Diversificación de la pequeña y mediana minería, SERPLAC - Atacama. Copiapó.

Ulriksen, C. 1990. Mapa Metalogénico de Chile entre los 18° y 34° S. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, No. 42, 112 p., 1 mapa escala 1:100.000 en tres hojas.

Vasallo, L.F., 2008, Yacimientos Minerales Metálicos. Versión OnLine, Bol-e. Centro de Geociencias, UNAM Querétaro, México.

Villavicencio, E. 1946. Minas San Pablo 1 al 11, Cristo Rey 1 al 11 y Carbonillo 1 al 10, Sres. Eloy Pérez Araya y otros. (Inédito), Caja de Crédito Minero: 2 p.(*).

Vivallo, W.; Díaz, A.; Jorquera, R. 2008. Yacimientos Metalíferos de la Región de Atacama, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos, N° 27, 72 p., 1mapa escala 1: 500.000.

Welkner, D.; Arévalo, C.; Godoy, E. 2006. Geología de la Carta Freirina-El Morado, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 100, 50 p., 1 mapa escala 1:100.000.

Zhang, W.; Cheng, C. Y. 2007. Manganese metallurgy review. Parte I: Leaching of ores/secondary materials and recovery of electrolytic/chemical manganese dioxide. Hydrometallurgy Vol. 89 pag. 137 – 159.